

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Rehabilitación para el vuelo de una plataforma RPAS e implantación de un sistema de vuelo autónomo.

Autor: Carlos Martín Ayala

Tutor: Francisco Gavilán Jiménez

Dep. Ingeniería Aeroespacial
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Ingeniería
Aeroespacial

ESI - Universidad de Sevilla



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

**Rehabilitación para el vuelo de una plataforma
RPAS e implantación de un sistema de vuelo
autónomo.**

Autor:

Carlos Martín Ayala

Tutor:

Francisco Gavilán Jiménez

Dep. de Ingeniería Aeroespacial
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Trabajo fin de Grado: Rehabilitación para el vuelo de una plataforma RPAS e implantación de un sistema de vuelo autónomo.

Autor: Carlos Martín Ayala

Tutor: Francisco Gavilán Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A María Ángeles Ayala Díaz, por aportar siempre ese gramo de fuerza
A Alberto Martín Ayala, por recordarme siempre el camino
A Raquel Gallego Moreno, por estar en todo momento a mi lado y creer en mí
A Esteban Martín Lergo, porque sencillamente, sin ti no hubiera sido posible

Índice

1. Resumen y antecedentes.....	17
2. Readaptación del tren de aterrizaje.....	18
2.1 Tren principal	18
2.2 Tren delantero.....	23
3. Mejoras realizadas a la aeronave para su operatividad.....	26
3.1 Acabado superficial	26
3.2 Hélice.....	26
3.3 Alas.....	28
4. Instalación de hardware	29
4.1 Cambio de hardware.....	29
4.2 Ubicación de cada elemento hardware	31
4.2.1 Controladora	31
4.2.2 Módulo GPS	32
4.2.3 Elementos del grupo propulsor.....	34
4.2.4 Otros elementos de aviónica.....	37
4.3 Conexionado y cableado entre elementos	39
5. Instalación de software y calibrado inicial de hardware.....	43
5.1 Software utilizado como estación de tierra	43
5.1.1 Descripción del software	44
5.2 Calibrado inicial del hardware.....	53
5.2.1 Acelerómetros.....	53
5.2.2 Magnetómetro y giróscopos	53
5.2.3 Radio.....	54
5.2.4 Modos de vuelo	55
6. Inicialización y armado de la aeronave	58
6.1 Procedimiento de conexionado.....	58
6.2 Enlace Mavlink.....	59

6.3 Inicialización de sensores	60
6.4 Armado de la aeronave	64
7. Primer vuelo de prueba: bucle abierto	65
7.1 Objetivo de la prueba.....	65
7.2 Realización de la prueba.....	66
8. Pruebas de vuelo en modos semiautomáticos o de navegación asistida.....	68
8.1 Vuelo en modo FBWA.....	68
8.2 Vuelo en modo FBWB	71
8.3 Vuelo en modo Cruise	72
9. Cambio de plataforma: de Skywalker X8 a Scottish Aviation Bulldog	73
9.1 Motivos.....	73
9.2 Características de la nueva aeronave	75
9.3 Reubicación de los sistemas de aviónica.....	76
9.4 Vuelo de prueba en modo FBWB	77
9.5 Vuelo en modo Autotune.....	78
10. Vuelos autónomos haciendo uso del modo AUTO, y planes de vuelo	79
10.1 Configuración del guiado autónomo de la aeronave en pista.....	79
10.2 Creación de un plan de vuelo para llevarse a cabo de forma completamente autónoma	82
10.3 Aplicaciones del vuelo autónomo de plataformas RPAS	87
11. Conclusiones finales	88

Índice de figuras

2.1 Tren principal	18
Imagen 2.1.1	19
Imagen 2.1.2	19
Imagen 2.1.3	20
Imagen 2.1.4	21
Imagen 2.1.5	21
Imagen 2.1.6	22
Imagen 2.1.7	22
Imagen 2.1.8	23
2.2 Tren delantero.....	23
Imagen 2.2.1	24
Imagen 2.2.3	25
Imagen 2.2.4	25
3.1 Acabado superficial	26
Imagen 3.1.1	26
3.2 Hélice.....	26
Imagen 3.2.1	27
3.3 Alas.....	28
Imagen 3.3.2	29
4.1 Cambio de hardware.....	29
Imagen 4.1.2	31
4.2 Ubicación de cada elemento hardware	31
4.2.1 Controladora	31
Imagen 4.2.1.1	32
4.2.2 Módulo GPS	32
Imagen 4.2.2.1	33
Imagen 4.2.2.2	33

Imagen 4.2.2.3	34
4.2.3 Elementos del grupo propulsor	34
Tabla 4.2.3.1	34
Imagen 4.2.3.3	35
Imagen 4.2.3.4	35
Tabla 4.2.3.5	36
Imagen 4.2.3.6	36
Imagen 4.2.3.7	37
4.2.4 Otros elementos de aviónica	37
Imagen 4.2.4.1	38
Imagen 4.2.4.2	38
Imagen 4.2.4.3	39
4.3 Conexionado y cableado entre elementos	39
Imagen 4.3.1	40
Imagen 4.3.2	41
Imagen 4.3.3	42
Imagen 4.3.4	43
5.1 Software utilizado como estación de tierra	43
Imagen 5.1.1	44
5.1.1 Descripción del software	44
Imagen 5.1.1.1	45
Imagen 5.1.1.2	46
Imagen 5.1.1.3	46
Imagen 5.1.1.4	47
Imagen 5.1.1.5	48
Imagen 5.1.1.6	49
Imagen 5.1.1.7	50
Imagen 5.1.1.8	51
Imagen 5.1.1.9	51
Imagen 5.1.1.10	52
Imagen 5.1.1.11	52
5.2 Calibrado inicial del hardware	53
5.2.1 Acelerómetros	53

Imagen 5.2.1.1	53
5.2.2 Magnetómetro y giróscopos	53
Imagen 5.2.2.1	54
5.2.3 Radio.....	54
5.2.4 Modos de vuelo	55
6.1 Procedimiento de conexionado.....	58
6.2 Enlace Mavlink.....	59
Imagen 6.2.1	60
6.3 Inicialización de sensores	60
Imagen 6.3.1	61
Imagen 6.3.2	62
Imagen 6.3.3	63
6.4 Armado de la aeronave	64
Imagen 6.3.4	65
7.1 Objetivo de la prueba.....	65
7.2 Realización de la prueba.....	66
Imagen 7.2.1	66
Imagen 7.2.2	67
Imagen 7.2.3	68
8.1 Vuelo en modo FBWA.....	68
Imagen 8.1.1	69
Imagen 8.1.2	70
Imagen 8.1.3	71
8.2 Vuelo en modo FBWB	71
Imagen 8.2.1	72
8.3 Vuelo en modo Cruise	72
Imagen 8.3.1	73
9.1 Motivos.....	73
Imagen 9.1.1	74
Imagen 9.1.3	75
9.2 Características de la nueva aeronave	75
Imagen 9.2.1	76
9.3 Reubicación de los sistemas de aviónica.....	76

Imagen 9.3.1	77
9.4 Vuelo de prueba en modo FBWB	77
Imagen 9.4.1	78
9.5 Vuelo en modo Autotune.....	78
Imagen 9.5.1	79
10.1 Configuración del guiado autónomo de la aeronave en pista.....	79
Imagen 10.1.1	80
10.2 Creación de un plan de vuelo para llevarse a cabo de forma completamente autónoma	82
Imagen 10.2.1	83
Imagen 10.2.2	84
Imagen 10.2.3	84
Imagen 10.2.4	85
Imagen 10.2.5	86
Imagen 10.2.6	86
Imagen 10.2.7	87
10.3 Aplicaciones del vuelo autónomo de plataformas RPAS.....	87

1. Resumen y antecedentes

Previamente a la realización de este trabajo, otros alumnos han llevado a cabo sus respectivos trabajos final de grado o carrera haciendo uso de la aeronave que va a ser usada para la realización de este trabajo (Skywalker x8). Por tanto, se va a analizar las condiciones en las que se encuentra ésta, así como las modificaciones o mejoras necesarias en la misma para su correcta operatividad y vuelo.

En primer lugar, se puede apreciar que el tren de aterrizaje, tanto el delantero como el principal, ha sufrido daños importantes debido a un aterrizaje forzoso. Por tanto, se debe proceder a la rehabilitación del mismo.

Aprovechando estas circunstancias, se van a introducir modificaciones en la geometría del tren principal con el objetivo de mejorar las actuaciones de la aeronave durante las maniobras de despegue y aterrizaje, así como el rodaje en tierra.

Estas modificaciones consistirán en el aumento de la distancia entre ruedas del tren principal, con el objetivo de aumentar la estabilidad transversal de la aeronave, así como el desplazamiento hacia adelante de todo el tren, para favorecer el movimiento de rotación durante la carrera de despegue, al situar éste más cerca del centro de gravedad de la aeronave.

En segundo lugar, se va a sustituir la hélice que propulsaba la aeronave, la cual era de tipo fijo, por una hélice plegable, con el objetivo de mejorar las características aerodinámicas del ala volante durante el planeo, y ganar así en autonomía de vuelo, además de mejorar las actuaciones de la aeronave en vuelo.

En tercer lugar, se hará una completa actualización de todo el equipo de aviónica de la aeronave, así como de su distribución en el interior de la misma, reduciendo en la medida de lo posible las interferencias y ruidos que pudieran causar problemas en las señales proporcionadas por los sensores y las señales enviadas a los elementos de control.

En cuarto lugar, se van a realizar pequeñas reparaciones y modificaciones sobre toda la aeronave, tales como la readaptación del tubo de Pitot-estática, el cual estaba despegado del lugar que le correspondía, o el sellado de pequeñas grietas y golpes que presenta la superficie de la aeronave, con el objetivo de mejorar las características aerodinámicas de la misma.

Con la aeronave lista para el vuelo, pasaremos a estudiar y analizar qué estación de tierra se va a utilizar para su control, herramienta donde posteriormente procederemos

a programar y ajustar todos los parámetros necesarios para la correcta operación de la aeronave tanto en modos de navegación asistida como en modo automático.

Anteriormente a la realización de vuelos de forma automática nos veremos obligados a cambiar de aeronave debido a los daños ocasionados en la aeronave inicial tras el fallo de un servomotor en el transcurso de la maniobra de despegue de una de las pruebas de vuelo. Por ello, será necesario un reajuste de la electrónica y una puesta a punto de la nueva plataforma RPAS a utilizar.

Por último, procederemos a analizar las aplicaciones y posibilidades que se presentan gracias al uso de este tipo de tecnología de plataformas RPAS de vuelo autónomo, así como las conclusiones finales el estudio.

2. Readaptación del tren de aterrizaje

2.1 Tren principal

Con el objetivo de llevar a cabo las mejoras anteriormente mencionadas en el capítulo de antecedentes, se ha procedido a la reubicación del tren de aterrizaje principal. La nueva posición de ocupará cada uno de los extremos superiores del eje del mismo será de 50 mm hacia delante de la posición actual y de 20 mm hacia el exterior del fuselaje. Por otro lado, el nuevo ángulo de inclinación elegido para el tren es de 18 grados respecto a la vertical en sentido horario.

El entorno elegido para la nueva ubicación del tren es el que se muestra en la imagen 2.1.1. Para la sujeción del tren en dicha zona, se ha procedido a la medición de la misma y al diseño de una pieza que cumpliera con las características y requisitos mecánicos necesarios para el agarre del tren, y la distribución de las fuerzas que éste soporta durante la maniobra de aterrizaje, al resto de la estructura de la aeronave. Dicha pieza, como podemos ver en las imágenes 2.1.2 y 2.1.3, ha sido diseñada en CATIA V5, tomando como diámetro de los orificios de los tornillos de sujeción 3 mm y 10mm para el eje del tren. Para la fijación del tren a la pieza, será necesario mecanizar un nuevo orificio para alojar un perno de sujeción, el cual se realizará posteriormente a la fabricación de la pieza.



Imagen 2.1.1

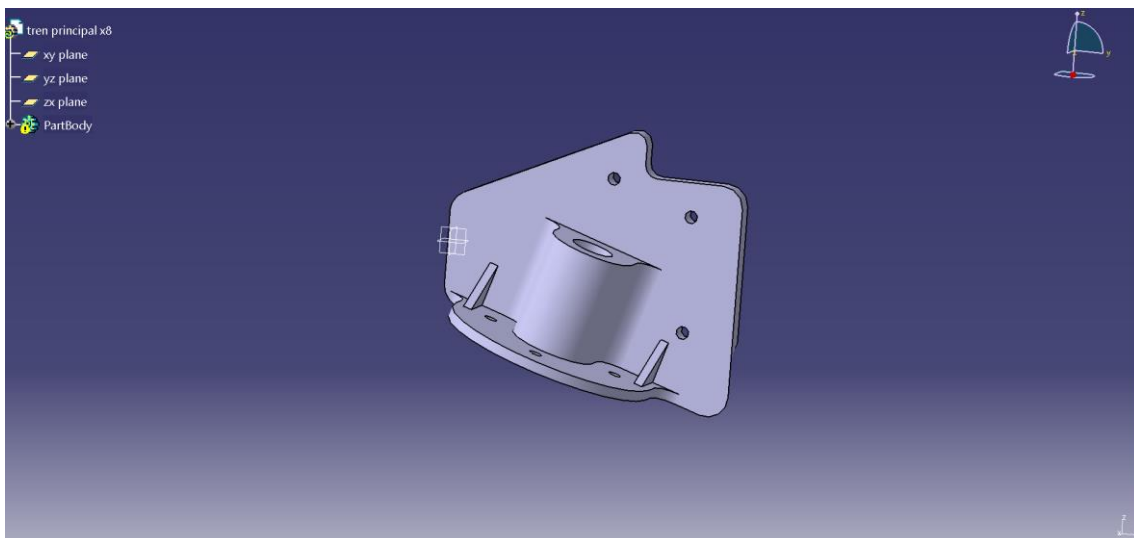


Imagen 2.1.2

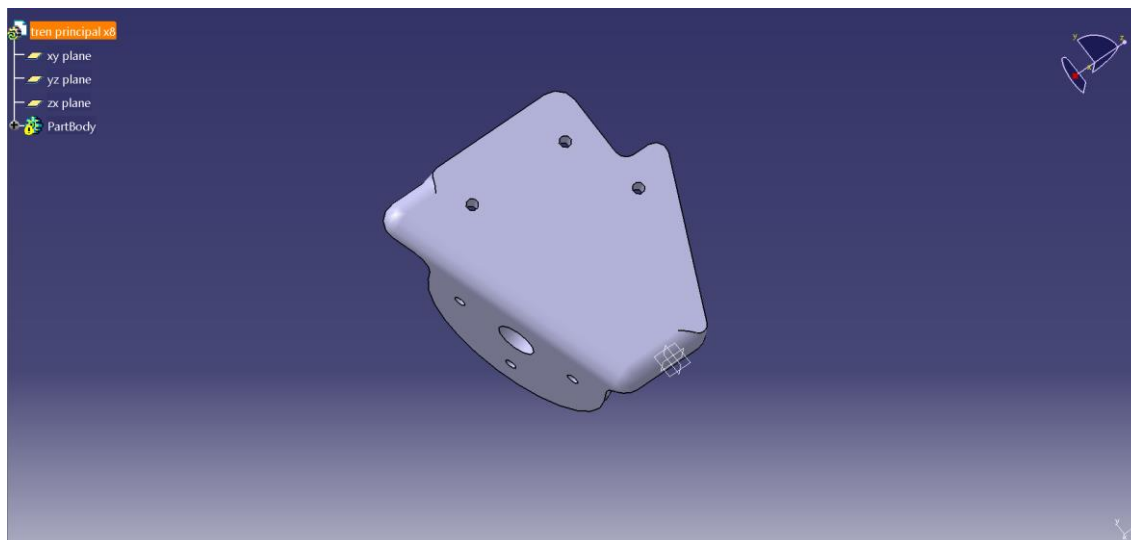


Imagen 2.1.3

El método elegido para la fabricación de la pieza ha sido la impresión en 3D en plástico PLA usando una impresora Anet A8. Para ello, se ha exportado la pieza desde CATIA en formato .stl y se ha configurado su impresión usando el software libre CURA de ULTIMAKER. Con el objetivo de que la pieza cumpliera con las exigencias mecánicas a las que será sometida, se ha optado por una impresión de calidad, con una altura de capa de 0.15 mm, una velocidad de impresión de 50 mm/s y un ratio de relleno del 50%, el cual nos ofrece una resistencia excepcional sin añadir demasiado peso extra a la pieza. Por último, el peso de la pieza marcado por CURA es de aproximadamente 23 g.

Cabe destacar que se ha llevado a cabo la impresión de dos de estas piezas, simétricas entre sí, para la sujeción de ambos brazos del tren principal. El proceso de impresión y acabado final de ambas piezas puede apreciarse en las imágenes 2.1.4 y 2.1.5

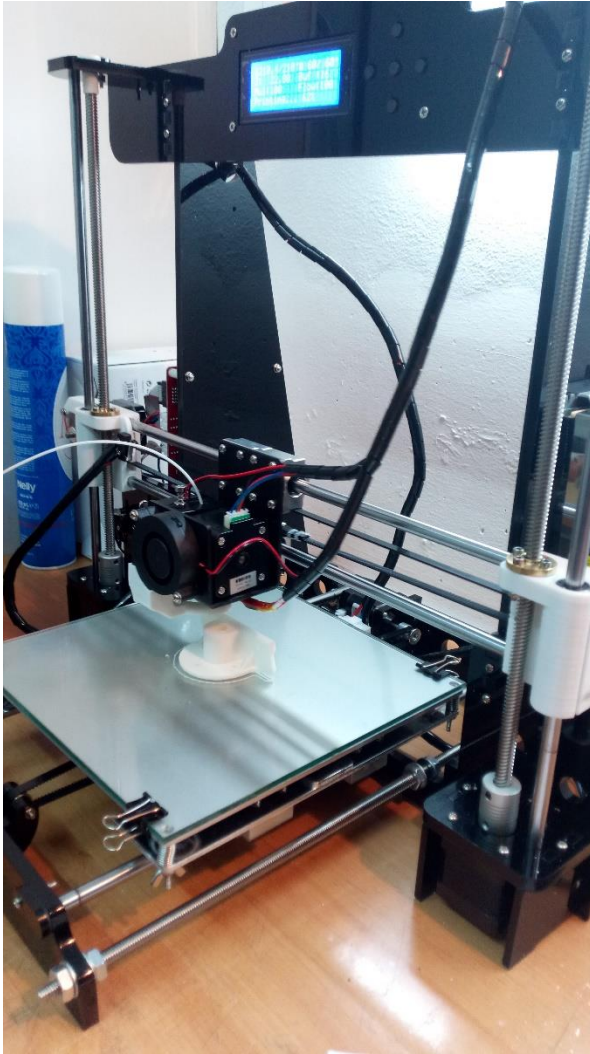


Imagen 2.1.4



Imagen 2.1.5

Para finalizar el conjunto de agarre del tren principal, se han impreso otras dos piezas (imagen 2.1.6) que se ubicarán en la zona inferior exterior del fuselaje, cuya función será fijar la posición de los brazos del tren, mediante un pasador situado en cada

uno de ellos, y además, repartir la fuerza de impacto al aterrizaje por todo el fuselaje, para evitar así posibles daños en la zona interna donde van ancladas las piezas de la imagen 2.1.5.



Imagen 2.1.6

En la siguiente imagen se puede observar cómo queda instalada la nueva cogida del tren principal en el interior del fuselaje.



Imagen 2.1.7

Por último, podemos ver en la imagen 2.1.8 la disposición final del tren principal desde el exterior de la aeronave.



Imagen 2.1.8

2.2 Tren delantero

El tren delantero se presentaba completamente inoperativo, debido a que los sistemas de fijación al fuselaje estaban fuertemente dañados. Por tanto, se ha procedido a la fabricación de unas nuevas fijaciones, realizadas en panel de contrachapado. Dichas fijaciones constan de dos piezas, que pueden apreciarse en la imagen 2.2.1, con la doble función de mantener el tren en su posición rígidamente y no permitir que pueda haber variaciones en el ángulo de este respecto a la vertical (lo cual podría ocurrir en el caso de montar una fijación de una única pieza), y a su vez repartir la fuerza del impacto al aterrizaje por todo el fuselaje, de igual manera que se realizaba con el tren principal.



Imagen 2.2.1

Tras las primeras pruebas de rodaje, se hizo necesario reemplazar el brazo del tren delantero por completo debido a que el que monta no es lo suficientemente rígido para poder realizar virajes cerrados, ya que las varillas de acero que forman la horquilla y amortiguación flectan, causando que la aeronave caiga y golpee el suelo por su parte delantera.

La decisión tomada para la construcción del nuevo tren de aterrizaje consiste en la fabricación mediante diseño CAD en SOLIDWORKS e impresión 3D, de una nueva horquilla para la sujeción de la rueda, la cual se fija mediante dos tornillos pasantes a un brazo realizado con una varilla de aluminio de 10mm de diámetro a la cual se ancla la transmisión del servo de dirección.

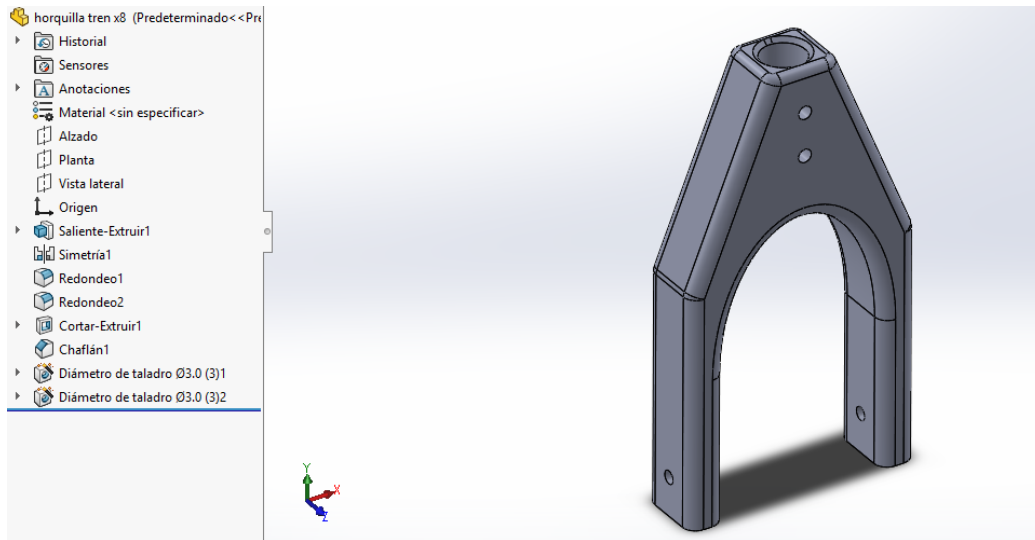


Imagen 2.2.3



Imagen 2.2.4

Con estas nuevas configuraciones en el tren de aterrizaje, la aeronave permite un rodaje en pista adecuado y por tanto quedaría de nuevo operativa, a falta de las modificaciones que se detallarán en el siguiente punto.

3. Mejoras realizadas a la aeronave para su operatividad

3.1 Acabado superficial

La aeronave presentaba al momento de su recogida fuertes marcas y grietas en toda la superficie del fuselaje debido a usos anteriores. Dichas marcas no presentan problemas a nivel estructural, aunque sí a nivel aerodinámico, y en menor medida estético.

Para paliar dicho problema, se ha procedido al recubrimiento de todo el fuselaje con vinilo en dos colores, amarillo para la parte inferior y azul para la parte superior, quedando así una superficie lisa y continua, y siendo ahora la aeronave más fácilmente reconocible en vuelo para el piloto, lo que le permite al mismo, saber con más exactitud en cada momento, la actitud de la aeronave, aumentando así significativamente la seguridad en vuelo.



Imagen 3.1.1

3.2 Hélice

La decisión acerca de que hélice instalar es crucial en el rendimiento de la planta propulsora de la aeronave. Un motor con una carga muy pequeña, puede llegar a exceder

su régimen máximo recomendado de revoluciones por minuto, mientras que un motor con una carga excesiva puede llegar a experimentar un salto de polos, consecuencia de no tener a la entrada la potencia necesaria para mover la carga demandada.

El primer factor a tener en cuenta es la geometría de la hélice en cuanto a número de palas y si estas serán fijas o plegables.

Debido a las características aerodinámicas de la aeronave, de tipo ala, se ha optado por una hélice de tipo plegable de dos palas, para poder reducir al máximo la resistencia aerodinámica en momentos de planeo, con el fin de aumentar la autonomía de vuelo. Los parámetros escogidos para la hélice han sido 17 pulgadas de diámetro y 13 pulgadas de paso de hélice, siguiendo en una primera aproximación las recomendaciones proporcionadas por el fabricante del motor, las cuales se exponen en capítulos posteriores.

Durante las primeras pruebas de vuelo, se descubre un problema con la hélice plegable. Dicho problema consiste en que en el plegado, el centro de masas de una de las palas sobrepasa el eje de giro del motor, lo que causa que cuando el motor comienza a girar, dicha pala no tienda a abrirse, sino a cerrarse aún más, lo que induce unas vibraciones en el modelo muy peligrosas, además que hace totalmente imposible el vuelo.

Para solucionar este problema, se ha cambiado el cono de la hélice por uno de mayor tamaño. El nuevo cono interfiere con la hélice antes de que el centro de masas de esta sobrepase el eje de giro, por lo que siempre la hélice tenderá a abrirse cuando se aplique potencia al motor.



Imagen 3.2.1

Para el cálculo de la hélice óptima se ha utilizado el software “Motocalc”, el cual hace una estimación de la mejor configuración de planta propulsora para una aeronave en concreto dependiendo de las características de dicha aeronave y del sistema empleado. En este caso, se le han introducido al software datos de la aeronave como superficie alar, carga alar, peso máximo al despegue y dimensiones, además de los datos y características técnicas del motor, variador y baterías empleadas, dando como resultado algunas configuraciones de hélice que optimizan el rendimiento y el empuje del sistema.

De entre todas las hélices propuestas por el software, se descartaron las opciones de más de dos palas y se optó por la actual siguiendo el criterio de maximizar el diámetro en lo posible, de acuerdo a la distancia que existe entre el eje del motor y el suelo, de forma que la configuración sea segura en todo momento y no se produzca en ningún caso un impacto de la hélice con el suelo en el momento de la rotación al despegue.

Se ha optado por maximizar el diámetro en lugar del paso ya que disponemos de un motor de gran par y bajo número de revoluciones por minuto, los cuales ofrecen mayor rendimiento al mover una gran columna de aire, (aumento del diámetro de hélice manteniendo el paso) que acelerando en mayor medida una menor columna de aire (aumento del paso de hélice manteniendo el diámetro).

3.3 Alas

Las alas, al igual que el fuselaje, presentaban también daños en el momento de la recepción de la aeronave, que ha sido necesario reparar.

Por un lado, se han reconstruido las sujeciones de los winglets, las cuales estaban muy dañadas haciendo que dichos winglets no pudieran sujetarse al ala solidariamente con esta, sino que quedaban sueltos.

Por otro lado, se ha reforzado la zona de bisagra de los alerones, ya que dicha zona está construida con el mismo material del ala prensado a lo largo del eje de giro del alerón, una solución muy efectiva desde el punto de vista aerodinámico ya que existe continuidad en todo momento entre la superficie del extradós del ala y la del alerón, pero que tiene su punto débil en cuanto al desgaste por fatiga, ya que después de un tiempo de uso, se presentaban algunos cortes y grietas a lo largo de toda la bisagra.

Para solucionar esto, se ha optado por cubrir toda la zona con cinta adhesiva reforzada con fibras, de forma que se sigue manteniendo la continuidad entre las superficies, y se asegura la zona contra un mayor desgaste futuro, evitando así posibles problemas en vuelo.



Imagen 3.3.2

4. Instalación de hardware

4.1 Cambio de hardware

Una vez terminada la remodelación y puesta a punto de la aeronave, se procede a la instalación del hardware necesario para poder realizar vuelos estabilizados y posteriormente autónomos con la misma.

Para ello, se ha decidido reemplazar el hardware anteriormente utilizado, basado en una controladora APM 2.6 apoyada por una Raspberry Pi con enlace wifi a tierra.

En su lugar se va a instalar la nueva controladora Pixhawk, que presenta una mayor capacidad de proceso, así como buses con un mayor tamaño de bits y una capacidad de memoria muy superior gracias a la inclusión de una tarjeta micro SD.

Por otro lado, se ha cambiado el equipo de radio con el cual se controla la aeronave por uno más actual. Se trata de un equipo Futaba T10J con tecnología T-FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum o espectro ensanchado por salto de frecuencia), que, usando la popular banda de 2.4GHz, utiliza un tipo de modulación en el que la señal se emite sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatorias, saltando de una frecuencia en otra de forma síncrona con el transmisor, para lo cual el receptor sigue exactamente la misma secuencia de saltos (ver imagen 4.1.2). Esto disminuye prácticamente a cero la posibilidad de interferencia o ruido en la señal recibida, además de conseguir que sea prácticamente imposible para otro receptor recibir la información enviada, ya que recibirá unos pulsos aparentemente aleatorios que no serán más que ruido, lo cual aumenta considerablemente la seguridad de la aeronave por ejemplo en aplicaciones de tipo militar, en las que ya se usa este tipo de tecnología de transmisión y modulación de señales. Por otro lado, un inconveniente que presenta este sistema de emisión de radiofrecuencias respecto a otros sistemas más convencionales es la necesidad de un mayor ancho de banda para las transmisiones, debido a los saltos de frecuencia.



Imagen 4.1.1

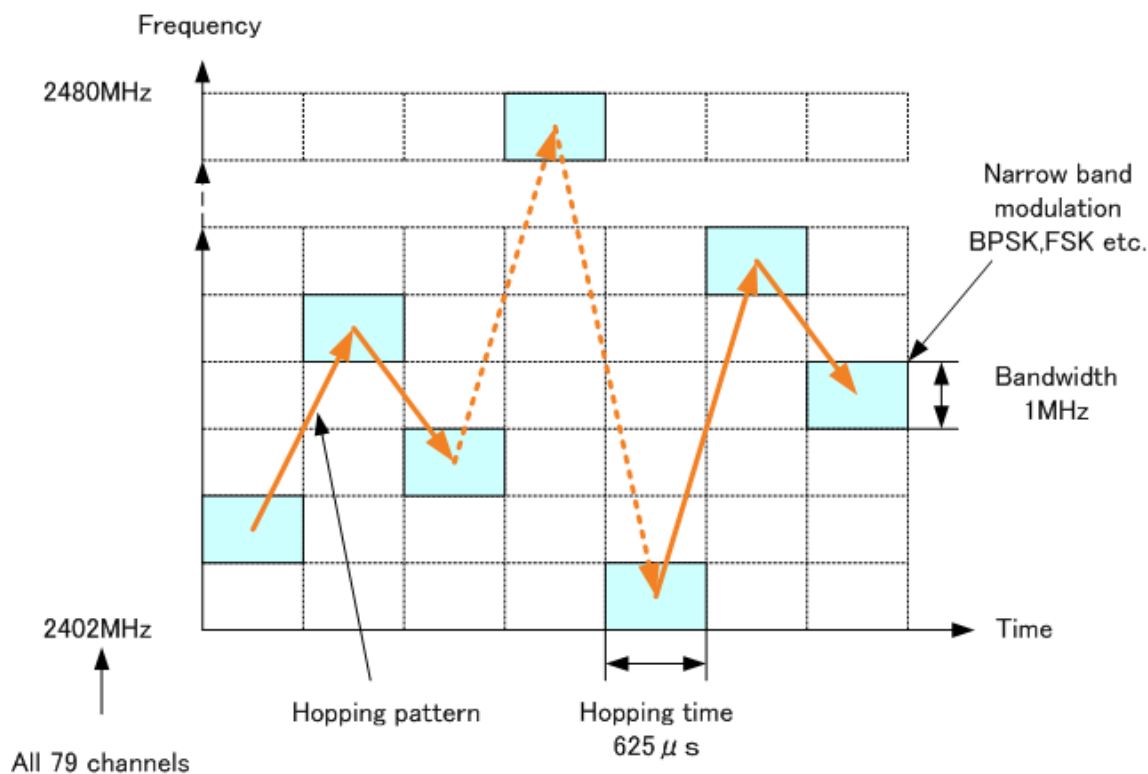


Imagen 4.1.2

4.2 Ubicación de cada elemento hardware

4.2.1 Controladora

El principal elemento de control, la controladora Pixhawk, irá situada sobre el centro de masas de la aeronave, ya que contiene la unidad de medidas inerciales (IMU), compuesta por acelerómetros y giróscopos, y por tanto, las medidas ofrecidas por esta, serán mucho más fieles si se encuentra situada justo sobre el centro de masas, o lo más próxima a él. De no ser así, y estar situada la IMU fuera de alguno de los ejes principales de la aeronave, un giro alrededor de dicho eje producirá en la controladora una velocidad angular distinta de cero, y por tanto estará midiendo una aceleración distinta de cero en un plano normal a dicho eje.

En la práctica, siempre que la controladora se sitúe en una posición relativamente centrada en la aeronave, las aceleraciones producidas por los giros de ésta serán despreciables, y no tendrán efectos adversos en el correcto control y guiado de la misma.

La controladora presenta una flecha que irá alineada con el eje longitudinal de la aeronave, apuntando hacia delante. Esto nos permite alinear el magnetómetro interno de la controladora con el magnetómetro externo, que se encuentra en el módulo GPS, dándonos así una medida más certera de la orientación de la aeronave respecto al norte magnético.

Se ha colocado la controladora sobre una base de panel de contrachapado que irá nivelada con el plano que contiene a los ejes longitudinal y transversal de la aeronave. La sujeción a esta base se ha realizado mediante bolas de goma, permitiendo así aislarla controladora de las vibraciones de la aeronave, lo que permite obtener medidas más limpias y libres de ruido.

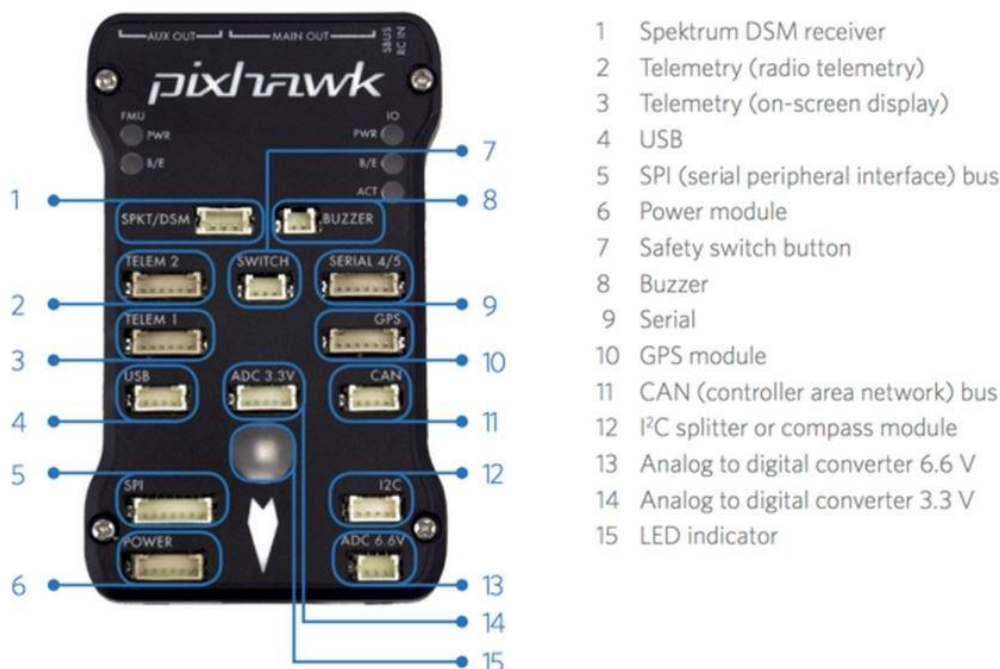


Imagen 4.2.1.1

4.2.2 Módulo GPS

El módulo GPS, que contiene el receptor GPS y un magnetómetro (que se usará como brújula principal, apoyada por la interna de la controladora), irá situado sobre una base elevada en el exterior del fuselaje, en la zona delantera de la aeronave, con el objetivo de alejarlo lo máximo posible del campo magnético creado por el motor, y aislado lo máximo posible de otros cables y antenas que pudieran crear campos magnéticos que puedan interferir en el magnetómetro y alterar sí la medida proporcionada por este.

La base sobre la que se sitúa este módulo ha sido diseñada con SOLIDWORKS a medida para la posición que debía ocupar en la aeronave, y posteriormente impresa en 3D.

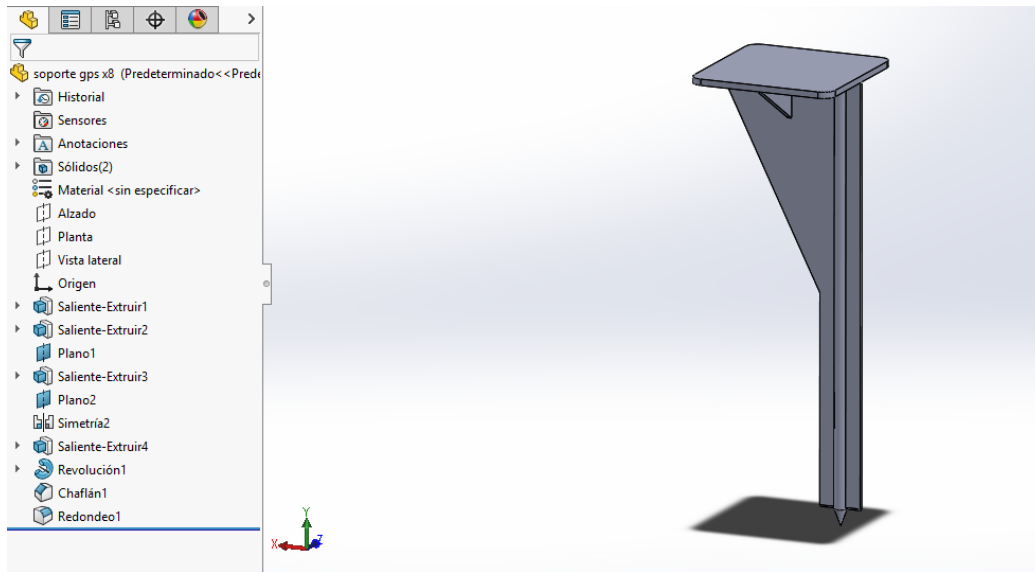


Imagen 4.2.2.1



Imagen 4.2.2.2

El módulo GPS, al igual que la controladora, presenta una flecha que apuntará hacia delante.



Imagen 4.2.2.3

4.2.3 Elementos del grupo propulsor

El motor en esta aeronave se sitúa en la parte posterior del fuselaje. Se trata de un motor AXI 4130/16 a 385rpm/V.

Este motor presenta las siguientes características (extraídas de la web del fabricante)

Peso con cables	409 gramos
Número de celdas de batería	16 a 24 NiMH, 5 a 8 LiPo
RPM/V	385
Máxima eficiencia	88 %
Máxima corriente eficaz	18A a 40A
Corriente a 10V sin carga	1.3A
Capacidad de corriente	60A/60s
Resistencia Interna	63mohm
Dimensiones (diámetro x longitud)	49.8x65.5 mm
Diámetro del eje	6mm

Tabla 4.2.3.1

Por otro lado, la siguiente imagen obtenida de igualmente de la web del fabricante, establece relaciones entre tipo de avión y vuelo a realizar, celdas necesarias de batería, peso del avión, hélice recomendada, etc.

	WEIGHT OF MODEL grams ounces	Li-pol CELLS	NICD CELLS	CURRENT MAX I _{MAX}	JETI ADVANCE Pro	PROPELLER
TRAINER	5500 194	6s	18	60A/60s	77A	16"x8"
AEROBATIC	4000 141	6s	18	60A/60s	77A	16"x10"
AEROBATIC	4500 159	8s	18	60A/60s	77A	14"x8"
SAILPLANE	6500 229	6s	18	60A/60s	77A	17"x9"
GLOW ENGINE CONVERSION	8 - 10 ccm / .54-.60 -2stroke .70-.80 -4stroke					

Imagen 4.2.3.2



Imagen 4.2.3.3

Delante del motor, en el compartimento más retrasado del interior de la aeronave se sitúa el variador.

La situación del variador es estratégica, ya que al situar en la parte posterior de la aeronave todos los elementos que conducen grandes corrientes eléctricas, conseguimos aislar en la medida de lo posible el resto de la aviónica de las interferencias y campos que generan estos elementos de potencia. Tan sólo un cable que alimenta el variador desde la batería recorre el fuselaje por su parte inferior derecha.

El variador utilizado es de la firma JetiModel, en concreto el modelo Mezon 115 Opto. El nombre del modelo hace referencia a la máxima intensidad de corriente (en amperios) que el variador es capaz de suministrar al motor de manera constante (puede llegar a suministrar algo más de forma puntual). El término Opto hace referencia a que la circuitería de control del variador esta opto acoplada al módulo de potencia del mismo, lo que disminuye en gran medida las interferencias que dicho módulo pudiera inducir en los circuitos de control.



Imagen 4.2.3.4

En la siguiente tabla podemos ver algunos de los datos técnicos del variador proporcionados por el fabricante:

Peso	145 gramos
Dimensiones en mm	36 x 24 x 109
Corriente admitida	115A
Temperatura operacional	-10° a 130°
Voltaje de alimentación	6V a 59V
Número de celdas LiXX	2 a 14

Tabla 4.2.3.5

Las baterías, tanto la que suministra potencia al motor como la que lo hace a la aviónica, van situadas en la parte más adelantada de la aeronave, ya que desempeñan un papel fundamental en el equilibrado de pesos de esta.

Por un lado, la batería principal es de la firma Zippy, se trata de una batería LIPO de 5 células y 5800 mA, lo cual nos proporcionará una autonomía suficiente al igual que la potencia necesaria, incluido un gran margen de seguridad para situaciones en las que es necesario realizar una maniobra rápida en vuelo, como recuperar el mando y control de la aeronave en una situación de inminente entrada en barrena.



Imagen 4.2.3.6

Debido al alto voltaje de esta batería, la usaremos junto con el módulo sensor de potencia para alimentar a la controladora a través de su puerto POWER, pero no podremos usarla para alimentar la ranura de servos.

Para esto usaremos una segunda batería, en este caso de la firma Turnigy, de 1500mA y 3 células, la cual conectaremos a un módulo BEC que alimentará la ranura de servos.



Imagen 4.2.3.7

4.2.4 Otros elementos de aviónica

Elementos como el receptor radiocontrol, el emisor de telemetría, el buzzer, el BEC, el módulo de potencia de la controladora, y el circuito dedicado al procesamiento de los datos suministrados por el sensor de velocidad de aire (tubo pitot-estática), van situados en el compartimento central del fuselaje, a ambos lados de la controladora y el módulo GPS, situados bajo el criterio de disminuir al máximo el cableado, y lograr así la mayor compatibilidad electromagnética posible entre elementos, para evitar interferencias y reducir al máximo el ruido creado en las medidas de los distintos sensores y circuitos a causa del efecto antena que presentan los cables y reducir así el acoplamiento entre líneas (fenómeno conocido como Crosstalk).



Imagen 4.2.4.1

El pulsador de seguridad, cuya finalidad es armar y desarmar todos los servos y el motor para evitar accidentes mientras la aeronave se encuentra en tierra, va insertado en un taladro de la parte superior del fuselaje, para su fácil y rápido acceso y operación.



Imagen 4.2.4.2

Por último, el tubo pitot va situado en la parte delantera-derecha del fuselaje, en la misma dirección que el eje longitudinal de la aeronave, de forma

que se encuentre siempre paralelo a la corriente incidente (o con el mismo ángulo de deriva respecto a esta que tenga la aeronave).

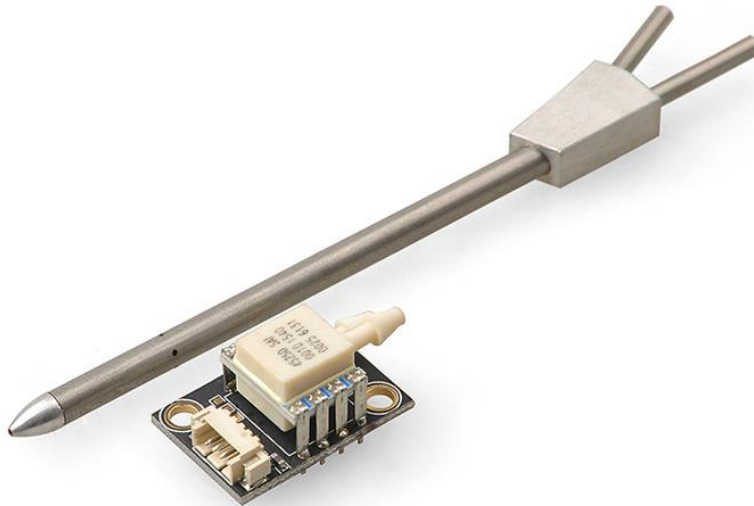


Imagen 4.2.4.3

4.3 Conexión y cableado entre elementos

En las próximas líneas, se van a detallar todas las conexiones y protocolos de comunicación usados para la interconexión de los distintos sistemas de aviónica montados en la aeronave.

El elemento central al cual van conectados todos los periféricos es la controladora, que dispone de múltiples puertos de entrada-salida para comunicarse con ellos.

Tras las primeras pruebas de rodaje, se toma la decisión de montar toda la aviónica sobre una única base, ya que esto permite situar cada módulo de forma fija con respecto a los demás, de forma que el cableado permanece estable en todo momento, y con la suficiente separación entre sí para que no se produzcan interferencias y ruidos indeseados.

La configuración final adoptada se puede observar en la siguiente imagen, en la cual se aprecia que los dos únicos elementos que no se sitúan dentro de la base común son el módulo de potencia, el cual necesariamente debe ir junto a la batería principal para su conexión, y el tubo de pitot, que irá situado en la zona frontal del fuselaje para que ninguna parte de la aeronave interceda en la corriente incidente.

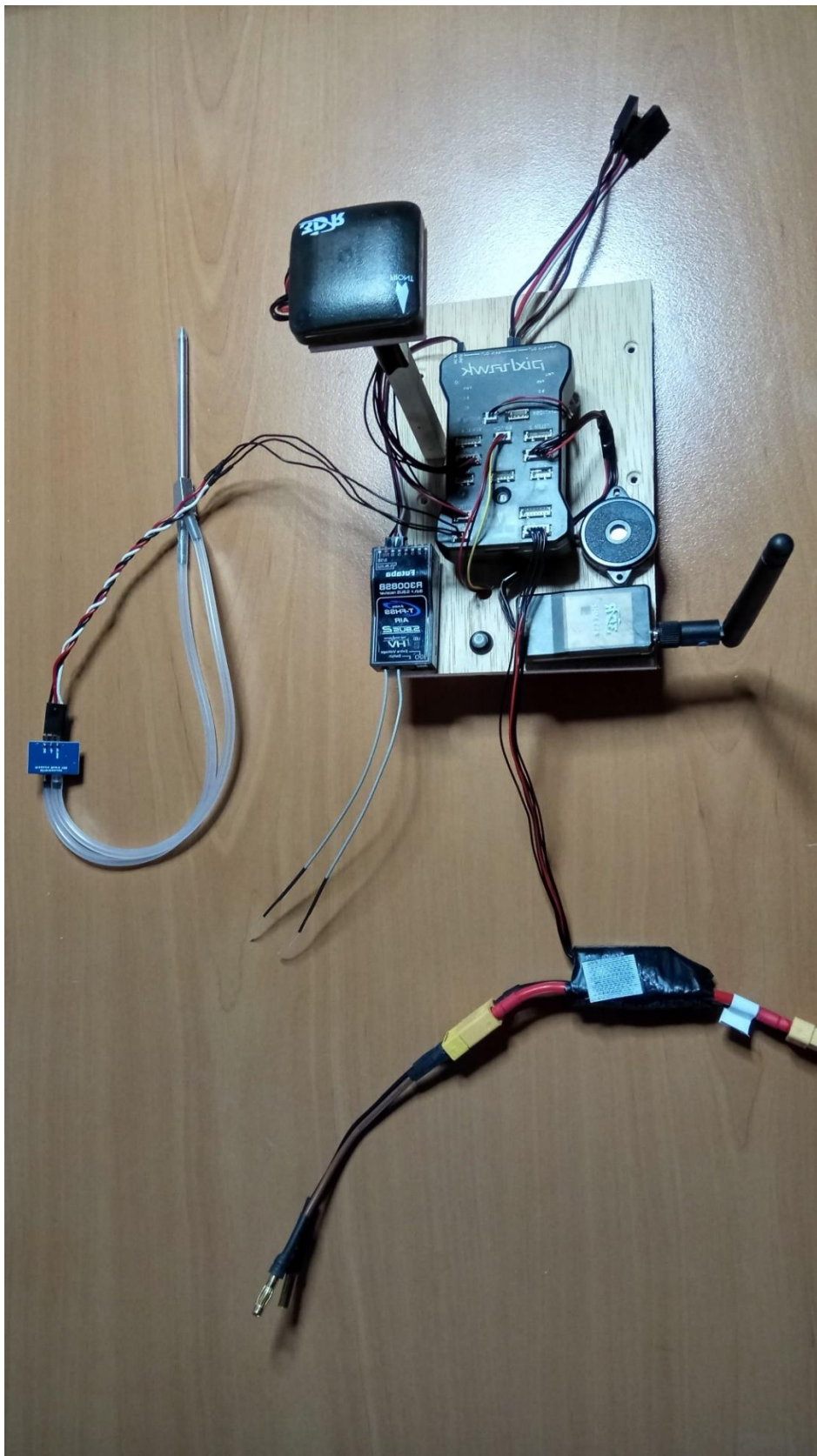


Imagen 4.3.1

Receptor: Se conecta a la controladora mediante un único cable, ya que usa el protocolo de comunicaciones SBUS2, que permite multiplexar las señales de todos los

canales a través de un único cable de señal, para ser demultiplexada posteriormente en la controladora, la cual extrae cada canal por un puerto de salida principal, donde se conectarán servos y el variador.

Este sistema nos elimina la necesidad de trabajar con un encoder ppm, además de reducir de forma muy importante la cantidad de cables empleados para la conexión de los canales a la controladora. Este es otro de los beneficios de haber utilizado un nuevo sistema de radio, como ya se explicó en capítulos anteriores.

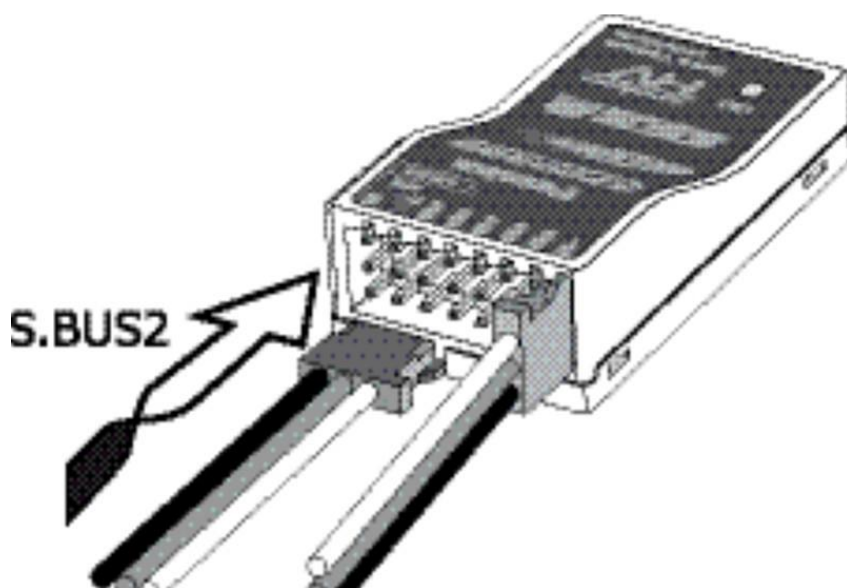


Imagen 4.3.2

Módulo GPS: Este módulo tiene dos buses de conexión, por un lado está el perteneciente al receptor GPS y por otro el del magnetómetro. (Véase imagen 4.2.2.3)

El primero de ellos irá conectado al puerto de la controladora destinado específicamente para el GPS, mientras que el segundo usará un protocolo de comunicaciones I2C y lo conectaremos a dicho puerto genérico.

Emisor de telemetría: Este módulo tiene un bus de conexión que irá conectado al puerto de telemetría 1 de la controladora, ya que esta viene equipada con dos puertos para telemetría. (Véase imagen 4.2.4.1)

Módulo de potencia: Este módulo tiene un bus de conexión que irá conectado al puerto "POWER" de la controladora, y alimentará a ésta desde la batería principal, lo que supondrá una alimentación de toda la electrónica interna a la controladora y la de otros módulos como el GPS, sensor de velocidad de aire, telemetría etc. (se excluye la alimentación de los servos, la cual será realizada por la batería secundaria a través del BEC)



Imagen 4.3.3

Sensor de velocidad de aire: Este sensor ofrece como salida unas medidas analógicas, es decir, unos valores de tensión, los cuales hay que interpretar y convertir en una señal digital. Por ello, el bus de conexión de este sensor se introduce en el puerto ADC (“Analog to Digital Converter”) de 6.6V de la controladora, el cual realizará primero la conversión a digital y posteriormente procesará la información para ofrecer el dato medido. (Véase imagen 4.2.4.3)

BEC: Este módulo es el encargado de reducir el potencial ofrecido por la batería de alimentación de la aviónica, de su valor nominal (11.1V) al valor soportado por la controladora y los servos (5V). Se conecta mediante un par de polos positivo-negativo al último puerto de salida principal de la controladora, que correspondería al canal 8, que al igual que ocurre con los receptores, este puerto puede actuar como salida para un canal o como entrada de potencia.



Imagen 4.3.4

Buzzer e interruptor de seguridad: Ambos periféricos van conectados a la controladora mediante puertos especialmente dedicados para ellos, llamados “Buzzer” y “Switch”. (Véase la imagen 4.2.4.2)

5. Instalación de software y calibrado inicial de hardware

5.1 Software utilizado como estación de tierra

Para el control, programación, recogida de datos y seguimiento en tiempo real de los vuelos, es necesaria la utilización de un software específico, denominado “ground station” o estación de tierra.

Son varios los programas de este tipo que trabajan con el sistema Ardupilot, pero se ha elegido el software “Mission Planner”, al ser el software oficial y de código abierto proporcionado para el sistema Ardupilot.

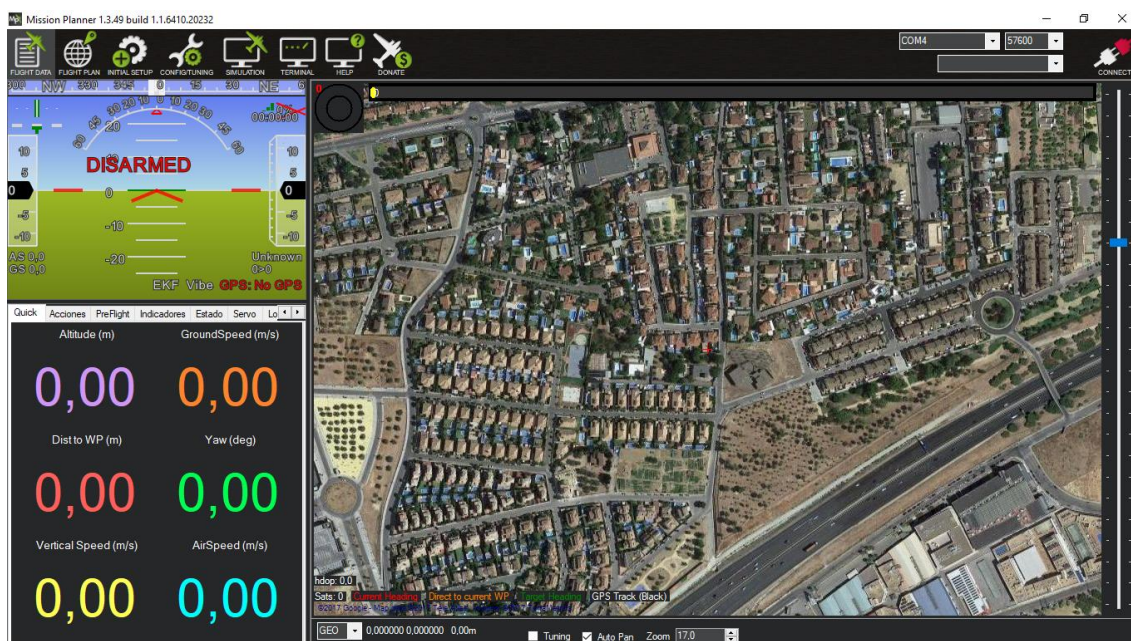


Imagen 5.1.1

Este software nos permitirá monitorear en tiempo real todos los parámetros de vuelo recogidos por nuestra aeronave, así como realizar distintas acciones sobre ésta gracias a la conexión de telemetría MAVLINK en tiempo real, como el armado y desarmado del sistema, el cambio de modos de vuelo, el calibrado de sensores etc.

Aparte de las funciones que pueden realizarse durante el vuelo, desde la estación de tierra podemos programar cada uno de los parámetros internos con los que trabaja cada sistema a bordo de la aeronave, principalmente los integrados en la controladora, aunque también parámetros del GPS y otros periféricos.

Una de las acciones destacables, es la posibilidad de dar valores a los parámetros P, I y D de cada uno de los PID que componen nuestra controladora, de forma que según la dinámica de vuelo de nuestra aeronave, podemos llegar a conseguir un ajuste muy fino del bucle de control que realizará la controladora.

Por otro lado, esta estación de tierra incluye una potente herramienta de post-procesado de datos de vuelo, mediante la cual seremos capaces, como se verá en posteriores capítulos, de graficar cada uno de los parámetros de vuelo y exportar dichas gráficas y tablas de datos a archivos Matlab, y además, podremos realizar una reproducción exacta de cada vuelo, similar a la que realizan los sistemas FDR (cajas negras) de las aeronaves convencionales. Por último, tendremos la opción de exportar el perfil completo de un vuelo a Google Earth, donde tendremos una representación en tres dimensiones del vuelo.

5.1.1 Descripción del software

Este software dispone de diversas pestañas que desempeñarán papeles importantes o incluso imprescindibles en el proceso de armado de nuestra aeronave para poderla hacer funcionar de forma autónoma.

Como hemos visto en la imagen 5.1.1, cuando iniciamos el programa veremos la pestaña de datos de vuelo, que podría decirse que es la pestaña principal, donde nos encontraremos con la información de mayor utilidad que podemos necesitar durante la fase previa al vuelo y el propio vuelo.

En la parte superior izquierda nos encontramos con el horizonte artificial, que será el principal indicador del estado de la aeronave en vuelo, ya que en él podremos ver desde la actitud de la aeronave, su velocidad o altitud, hasta el estado de conexión con el GPS, el voltaje de la batería principal en cada instante, o si la controladora está haciendo uso del filtro extendido de Kalman que lleva implementado.

Además de todos estos datos, en el horizonte artificial nos aparecerán sobreimpresionados los mensajes de posibles errores que pudieran estar ocurriendo, así como el estado de los sensores de a bordo.



Imagen 5.1.1.1

En la parte inferior derecha tenemos una ventana que a su vez contiene numerosas pestañas, las cuales serán de amplia utilidad y por tanto explicaremos detalladamente a continuación.

La primera de ellas, llamada “Quick”, muestra hasta 6 parámetros de vuelo a los que el piloto quiera tener un fácil y rápido acceso. Haciendo doble click izquierdo con el ratón sobre cualquiera de estos parámetros mostrados, se desplegará una lista con la totalidad de los parámetros transmitidos a la estación de tierra a través del enlace MAVLINK de telemetría, por lo que el piloto podrá elegir los 6 que le sean de mayor utilidad.



Imagen 5.1.1.2

La segunda pestaña, llamada “Acciones” muestra, como su propio nombre indica, diferentes acciones para realizar antes o durante el vuelo. Entre estas acciones se encuentran el armado/desarmado de la aeronave, que se explicará en detalle en capítulos posteriores, la calibración de los sensores de velocidad, que también será explicada posteriormente, y otras acciones de vuelo como la “vuelta a casa”, que dirige la aeronave de forma automática al punto donde fue armada, a una altitud de 100 metros (por defecto) y la mantiene dando círculos alrededor de dicho punto. Esta última acción es especialmente útil cuando la aeronave se ha alejado en exceso y resulta muy difícil su control de forma manual y visual.



Imagen 5.1.1.3

En la tercera pestaña, llamada “PreFlight” encontramos una lista de parámetros y sensores donde podremos seleccionar cuáles de ellos queremos que el sistema compruebe antes de armar la aeronave, con el fin de que todos los sistemas se encuentren en un estado correcto antes de iniciar el vuelo. En capítulos

posteriores se realizará una explicación en detalle de todo el procedimiento de armado de la aeronave, en el que se incluyen las comprobaciones pre vuelo.

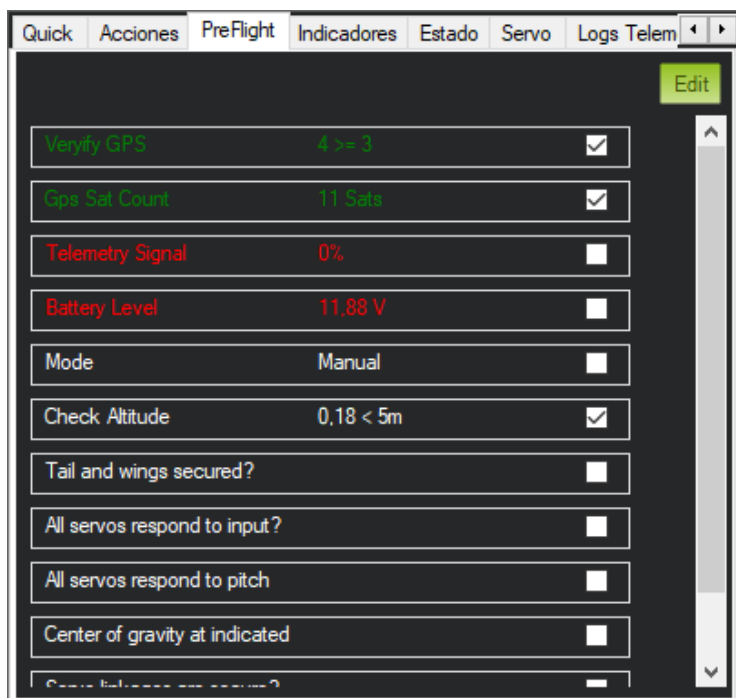


Imagen 5.1.1.4

En la cuarta pestaña, llamada indicadores, podemos ver la representación de algunos parámetros de vuelo como altitud, velocidad, rumbo, y velocidad vertical, representadas en forma de relojes analógicos, para que pilotos que usen con frecuencia estos relojes puedan tenerlos también durante el vuelo de una aeronave no tripulada.



Imagen5.1.1.5

La quinta pestaña, llamada “Estado” muestra la lista completa de parámetros recogidos en cada instante por la estación de tierra, a la cual también podremos acceder, como se explicó anteriormente, desde la pestaña “Quick”.

La sexta pestaña, llamada “Servo” nos muestra los valores de final de recorrido asignados a cada canal, lo que permite un acceso rápido a dichos parámetros para poder modificarlos sin tener que entrar en la lista completa de parámetros y hacer una búsqueda detallada.

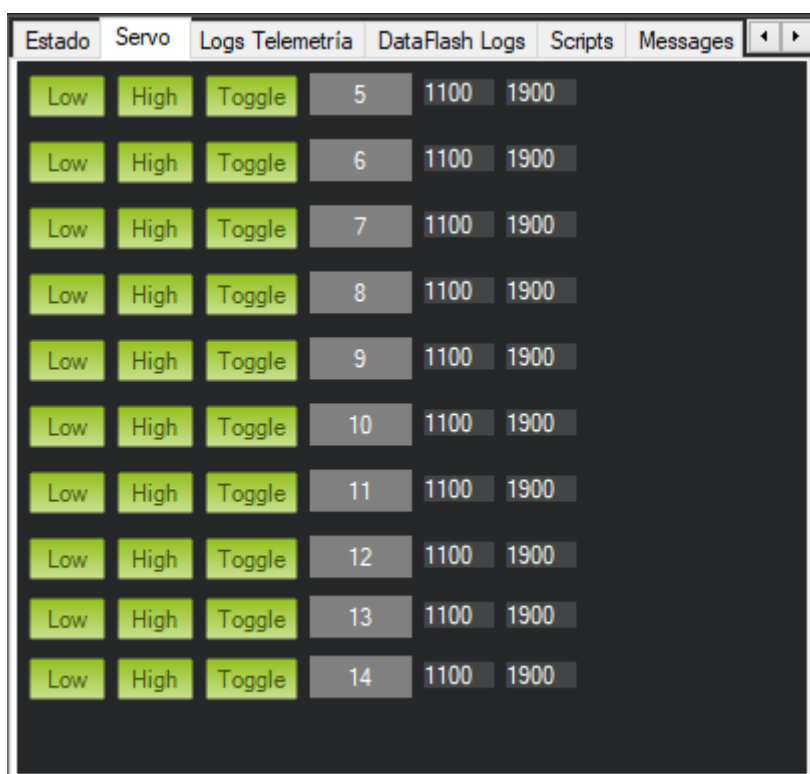


Imagen 5.1.1.6

Las siguientes tres pestañas están dedicadas al procesado y reproducción de archivos .log grabados durante los vuelos, y a la ejecución de scripts. Analizaremos en profundidad las opciones disponibles en la pestaña “Logs Telemetría” en capítulos posteriores.

Por último, en la pestaña llamada “Mensajes” podremos ver en detalle los posibles errores que el software pueda ir arrojando al realizar diferentes acciones, así como los procesos que el software va realizando en función de lo que el usuario realice en la estación de tierra o en la aeronave, por lo que es una fuente de información muy importante a la hora de hacer frente a problemas que en un primer momento puede desconocerse su causa.

Volviendo a las pestañas principales, la segunda que encontramos es la de plan de vuelo. Esta será la herramienta que se usará para crear y modificar las rutas y puntos de paso o waypoints para la programación de vuelos autónomos.

Esta pestaña consta de un gran mapa donde podemos observar la posición de la aeronave y puntos de relevancia como “Home”, que es el punto donde la aeronave quedó por primera vez situada por el GPS tras la conexión con la estación de tierra, o los waypoints que el piloto programe.

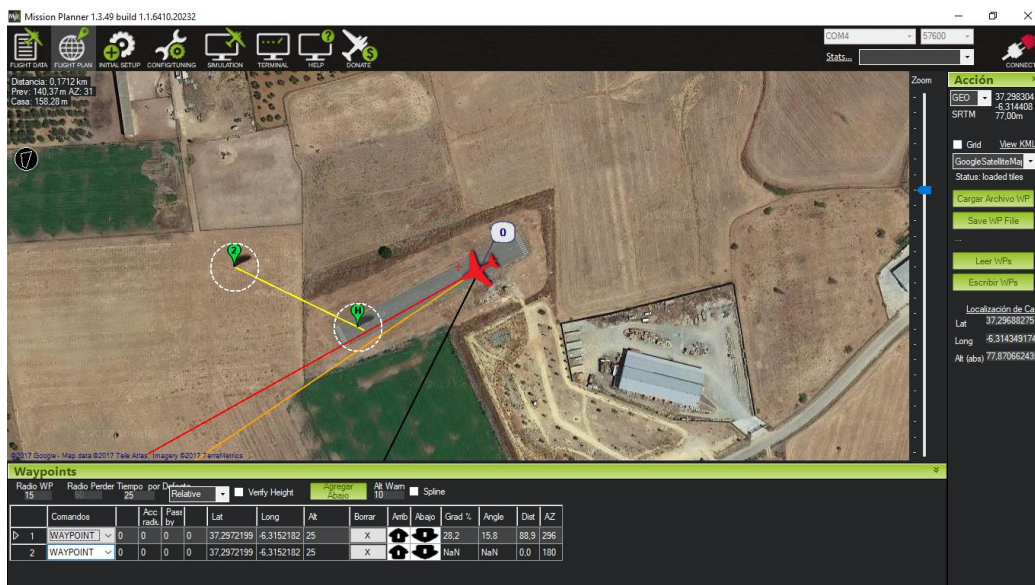


Imagen 5.1.1.7

Estos waypoints se crean haciendo doble click izquierdo sobre un punto del mapa, y se podrán cambiar de posición posteriormente manteniendo el botón izquierdo del ratón pulsado sobre ellos y desplazándolos en el mapa. Una vez creados, en la parte inferior de la pestaña se dispone del menú a través del cual vamos a poder ajustar todos los parámetros relativos a cada uno de dichos waypoints.

En la parte superior de dicho menú encontramos una serie de parámetros globales que podemos ajustar y que se irán asignando a todos los waypoints que vayamos creando, como son la altitud de paso, la altitud por debajo de la cual se emite un mensaje de advertencia de peligro, o el radio alrededor del waypoint en el que se considera que la aeronave ya ha pasado por dicho waypoint y debe dirigirse al siguiente.

Una vez que creamos un waypoint, éste aparece listado en este menú, y en forma de tabla se muestran algunos datos que podremos modificar. El primero es el estado del waypoint, que no es más que la función que pretendemos que realice dicho waypoint, o dicho de otra manera, la acción que realizará la aeronave cuando alcance el waypoint. Esto se presenta a través de un menú desplegable donde encontraremos decenas de diferentes acciones para asignar, por ejemplo punto de paso, aterrizaje, despeje, volar en círculo etc.

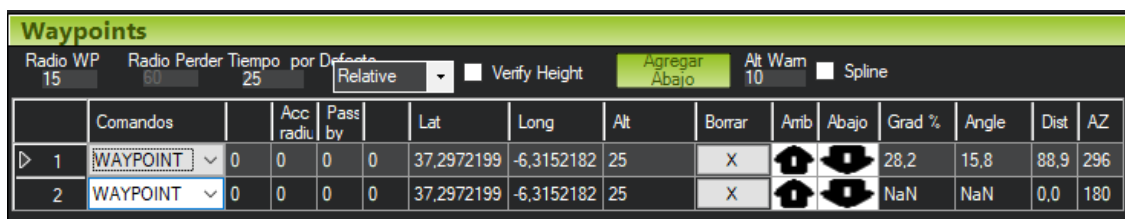


Imagen 5.1.1.8

En la parte derecha de la pestaña podemos ver un menú desde donde podremos elegir la fuente de la cual el software cargará el mapa. Tendremos además las opciones de cargar y guardar un archivo que contiene una ruta creada, y podremos escribir esta ruta en la memoria de la controladora de la aeronave, para que pueda proceder a ejecutarla.

Por último, en la parte más baja del menú se nos mostrará las coordenadas del punto asignado como “Home”.

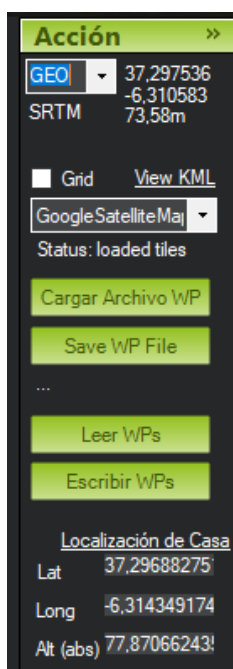


Imagen 5.1.1.9

Las siguientes dos pestaña que vemos en el software están dedicada a la configuración tanto del hardware y aviónica de la aeronave, como del propio software.

Desde aquí podremos modificar todos los parámetros que integran el sistema Ardupilot, incluidos los controladores PID. La primera de estas pestañas está más enfocada a las configuraciones iniciales, como son la instalación de firmware, la calibración de sistemas y la elección de qué tipos de sensores estarán operativos en nuestra aeronave.

Por otro lado, la segunda pestaña contiene un árbol o lista con todos los parámetros configurables tanto de la controladora como de otros módulos como puede ser el GPS o el sistema de radio.

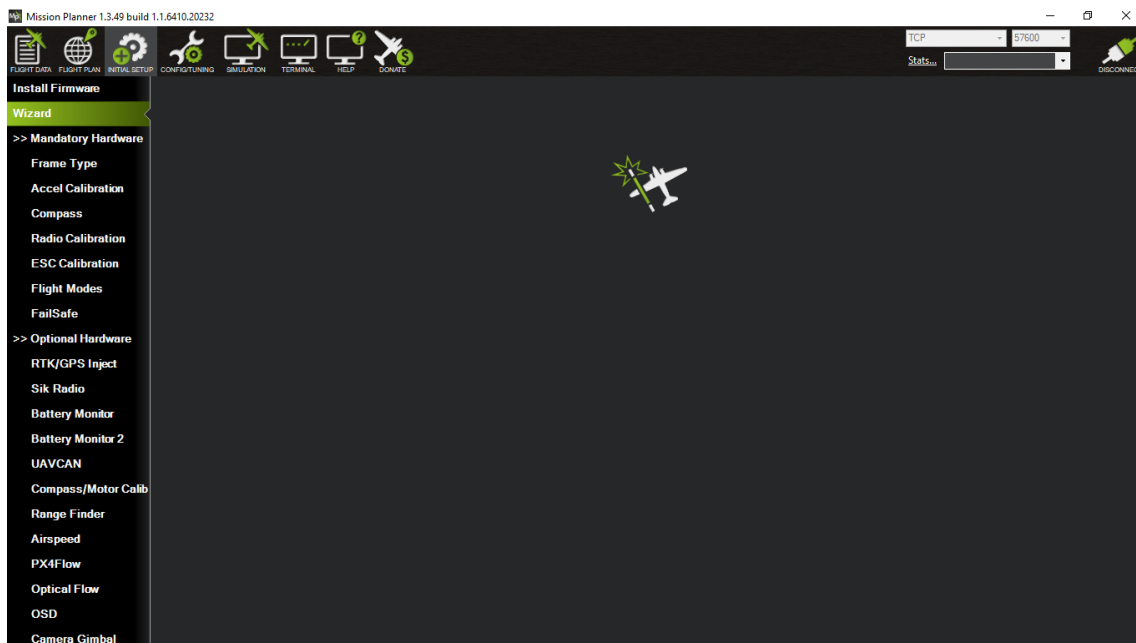


Imagen 5.1.1.10

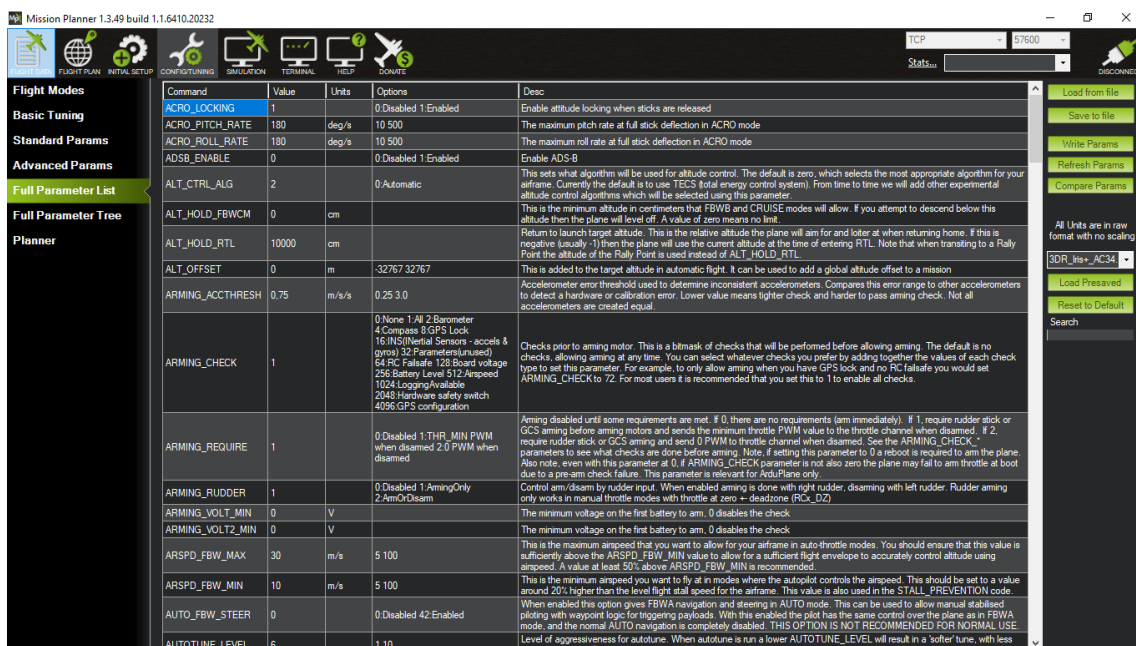


Imagen 5.1.1.11

Las pestañas que siguen contienen material necesario para desarrolladores, al tratarse de una plataforma de código abierto, por lo que no resultarán de interés en este estudio.

5.2 Calibrado inicial del hardware

Al conectar el sistema por primera vez a la estación de tierra, ésta nos requiere un calibrado general de todos los sensores una vez que todo el hardware ha sido montado de manera definitiva en la aeronave.

5.2.1 Acelerómetros

Lo primero que haremos será colocar la aeronave de forma estática en diferentes posiciones y ángulos según el software nos vaya indicando, de forma que los acelerómetros toman los ejes x, y, z de nuestra aeronave, a la vez que el sentido positivo y negativo de los mismos.

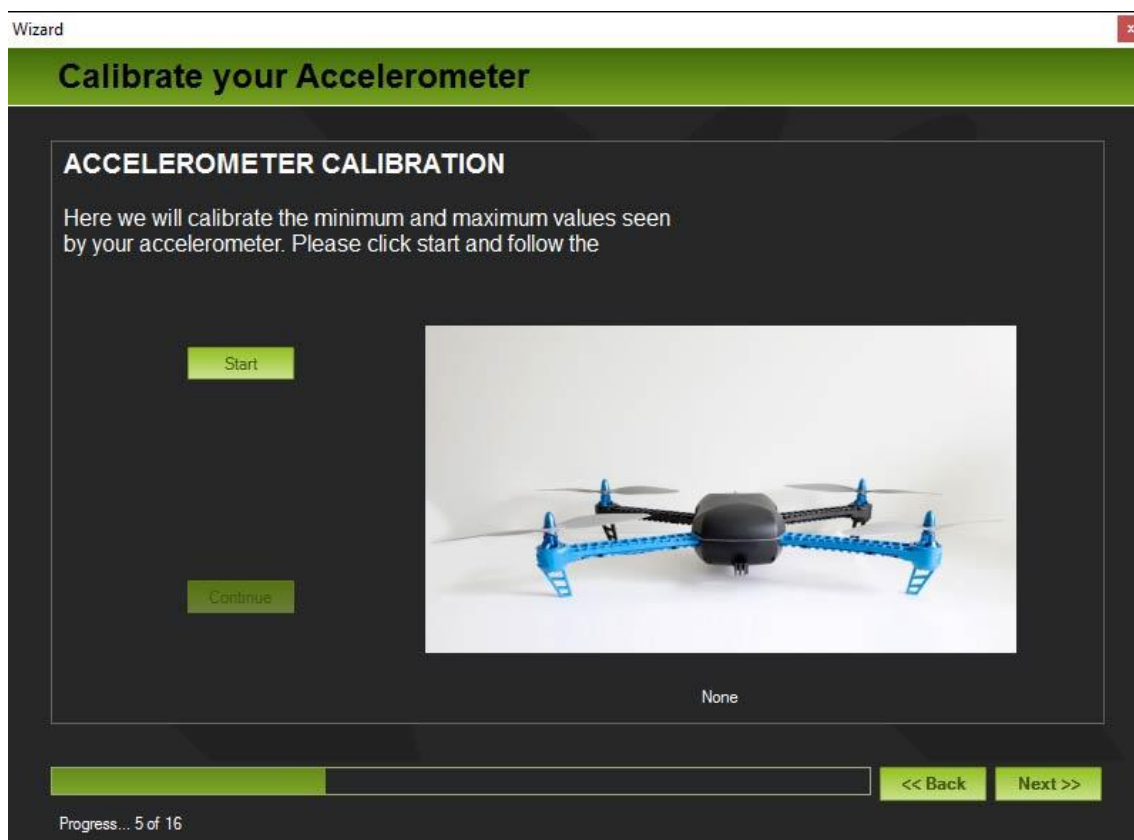


Imagen 5.2.1.1

5.2.2 Magnetómetro y giróscopos

En este caso, el software nos irá pidiendo realizar una serie de giros a nuestra aeronave, cada uno de ellos con la aeronave posicionada según unos ángulos determinados, mediante los cuales tanto el magnetómetro como los giróscopos tomarán los ejes x, y, z de la aeronave, para poder así interpretar correctamente los giros alrededor de cada uno de ellos.

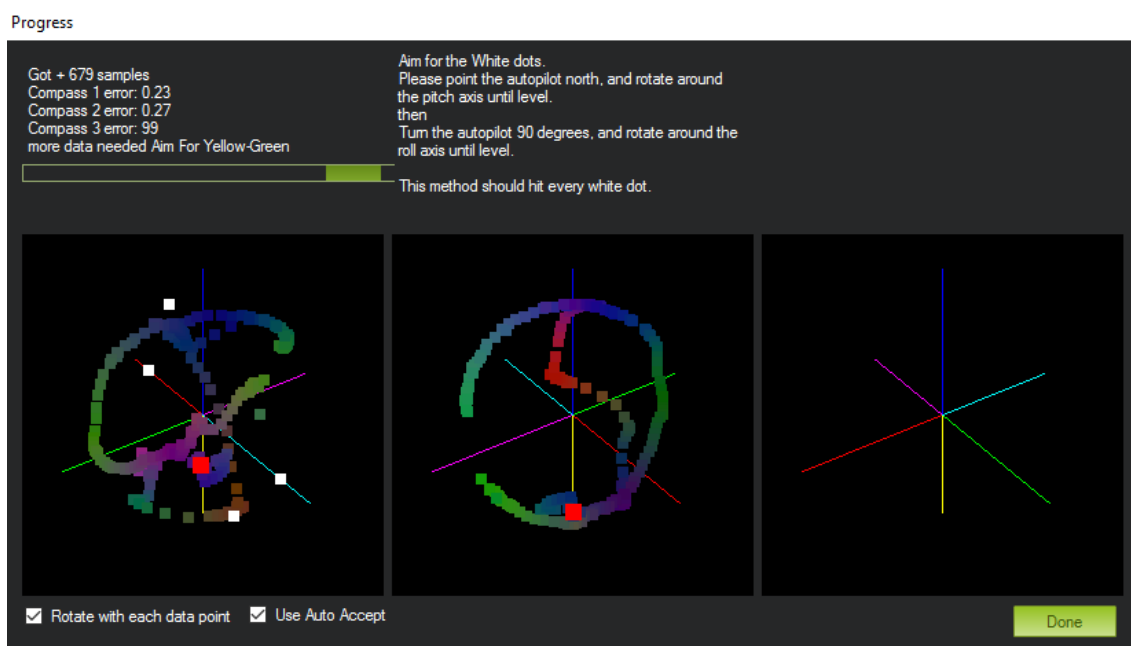


Imagen 5.2.2.1

5.2.3 Radio

El siguiente paso consiste en calibrar y centrar todos los mandos de nuestra emisora radiocontrol. Con este procedimiento conseguimos ajustar los mandos para que en su posición central correspondan al punto central de recorrido de cada servo, y de igual manera con los finales de recorrido. Posteriormente en la propia emisora podremos seguir ajustando muchos de estos parámetros con más detalle, así como el trimado de cada canal de forma independiente.



Imagen 5.2.3.1

5.2.4 Modos de vuelo

Por último, se nos pedirá asignar un canal de nuestra radio al selector de modos de vuelo. Para ello, se ha decidido asignar un interruptor de 3 posiciones de la emisora, correspondiente al canal 5. Con esto, tenemos la capacidad de conmutar entre tres modos de vuelo en cada momento, incluso durante un vuelo, función que utilizaremos en adelante. Los tres modos de vuelo elegidos son “MANUAL”, “FBWA”, “AUTO”, los cuales se definen a continuación citando el texto que se encuentra en la web oficial del proyecto Ardupilot para describir cada uno de dichos modos.

“MANUAL Mode

Regular RC control, no stabilization. All RC inputs are passed through to the outputs. The only ways in which the RC output may be different from inputs are as follows:

-if a configured failsafe or geofence triggers, and Plane takes control

-if the VTAIL_OUTPUT option is enabled, then a software VTAIL mixer is applied on the output

-if the ELEVON_OUTPUT option is enabled, then a software Elevon mixer is applied on the output”

“FBWA Mode (FLY BY WIRE_A)

This is the most popular mode for assisted flying in Plane, and is the best mode for inexperienced flyers. In this mode Plane will hold the roll and pitch specified by the control sticks. So if you hold the aileron stick hard right then the plane will hold its pitch level and will bank right by the angle specified in the LIM_ROLL_CD option (in centidegrees). It is not possible to roll the plane past the roll limit specified in LIM_ROLL_CD, and it is not possible to pitch the plane beyond the LIM_PITCH_MAX/LIM_PITCH_MIN settings.

Note that holding level pitch does not mean the plane will hold altitude. How much altitude a plane gains or loses at a particular pitch depends on its airspeed, which is primarily controlled by throttle. So to gain altitude you should raise the throttle, and to lose altitude you should lower the throttle. If you want Plane to take care of holding altitude then you should look at the FlyByWireB mode.

In FBWA mode throttle is manually controlled, but is constrained by the THR_MIN and THR_MAX settings.

In FBWA mode the rudder is under both manual control, plus whatever rudder mixing for roll you have configured. Thus you can use the rudder

for ground steering, and still have it used for automatically coordinating turns.”

“AUTO Mode

In AUTO mode Plane will follow a mission (a set of GPS waypoints and other commands) set by your ground station. When entering AUTO mode Plane will continue from whatever mission item it was last doing, unless you have reset the mission.

When in AUTO Plane will by default allow the pilot to influence the flight of the plane by using “stick mixing”, which allows for aileron, elevator and rudder input to steer the plane in a way that can override the autopilot control. Whether this is enabled is determined by the STICK_MIXING option. By default stick mixing behaves the same as FLY BY WIRE_A (FBWA) mode.”

Adicionalmente, hay otros dos modos interesantes para este estudio que se probarán y analizarán, con el objetivo de tener una amplia comparativa entre los distintos modos de vuelo que nos ofrece el sistema, y cómo afecta cada uno de ellos al vuelo de nuestra aeronave, con lo que podremos ver cuál de ellos es más conveniente en cada situación y cómo pueden ayudar al piloto en determinadas circunstancias con el control de la aeronave cuando esta no pueda volar de forma totalmente autónoma. Dichos modos son los llamados “FBWB” y “CRUISE” los cuales se describen a continuación.

“FBWB Mode (FLY BY WIRE_B)

The FBWB mode is similar to FLY BY WIRE_A (FBWA), but Plane will try to hold altitude as well. Roll control is the same as FBWA, and altitude is controlled using the elevator. The target airspeed is controlled using the throttle.

To control your altitude in FBWB mode you use the elevator to ask for a change in altitude. If you leave the elevator centred then Plane will try to hold the current altitude. As you move the elevator Plane will try to gain or lose altitude in proportion to how far you move the elevator. How much altitude it tries to gain for full elevator deflection depends on the FBWB_CLIMB_RATE parameter, which defaults to 2 meters/second. Note that 2 m/s is quite a slow change, so many users will want to raise FBWB_CLIMB_RATE to a higher value to make the altitude change more responsive.

Whether you need to pull back on the elevator stick or push forward to climb depends on the setting of the FBWB_ELEV_REV parameter. The

default is for pulling back on the elevator to cause the plane to climb. This corresponds to the normal response direction for a RC model. If you are more comfortable with the reverse you can set FBWB_ELEV_REV to 1 and the elevator will be reversed in FBWB mode.

Note that the elevator stick does not control pitch, it controls target altitude. The amount of pitch that will be used to achieve the requested climb or descent rate depends on your TECS tuning settings, but in general the autopilot will try to hold the plane fairly level in pitch, and will primarily climb or descend by raising or lowering the throttle. This can be disconcerting for people used to flying in FBWA mode, where you have much more direct control over pitch.

If you have an airspeed sensor then the throttle will control the target airspeed in the range ARSPD_FBW_MIN to ARSPD_FBW_MAX. If throttle is minimum then the plane will try to fly at ARSPD_FBW_MIN. If it is maximum it will try to fly at ARSPD_FBW_MAX.

If you don't have an airspeed sensor then the throttle will set the target throttle of the plane, and Plane will adjust the throttle around that setting to achieve the desired altitude hold. The throttle stick can be used to push the target throttle up beyond what it calculates is needed, to fly faster.

As with FBWA, the rudder is under a combination of manual control and auto control for turn coordination.

You should also have a look at CRUISE mode, as it is generally better than FBWB, especially if there is significant wind. In CRUISE mode the aircraft will hold a ground track as opposed to just levelling the wings when you don't input any roll with the aileron stick."

"CRUISE Mode

Cruise mode is a bit like FLY BY WIRE_B (FBWB), but it has "heading lock". It is the ideal mode for longer distance FPV flight, as you can point the plane at a distant object and it will accurately track to that object, automatically controlling altitude, airspeed and heading.

The way it works is this:

if you have any aileron or rudder input then it flies just like FBWB. So it holds altitude until you use the elevator to change the target altitude (at the FBWB_CLIMB_RATE rate) and it adjusts airspeed based on throttle

when you let go of the aileron and rudder sticks for more than 0.5 seconds it sets an internal waypoint at your current location, and projects a target waypoint one kilometre ahead (note that heading lock will only activate if you have GPS lock, and have a ground speed of at least 3 m/s) as it flies along it heads for the target waypoint, and constantly updates that target to always be one kilometre ahead, leaving the previous waypoint as the position that you centred the aileron and rudder sticks as long as you don't touch the aileron or rudder, it will run the same navigation system it uses for waypoints, including crabbing, cross-track etc, so it will very accurately hold that ground course even in the face of changing wind conditions

One of the nicer aspects of CRUISE mode is how it handles rudder. If you give it some rudder then the roll controller will keep the wings level, but the plane will yaw with the rudder. So you get a "wings level" turn, allowing you to rotate your flight to point at whatever geographic feature you want to head towards. Then when you let go of the rudder it will head straight for that point."

6. Inicialización y armado de la aeronave

6.1 Procedimiento de conexionado

El proceso de conexión de los sistemas de a bordo debe llevarse a cabo siguiendo una determinada secuencia, tanto para asegurar la correcta inicialización del equipo como para la seguridad del piloto y la propia aeronave en cada momento.

Comenzaremos conectando el ordenador portátil y ejecutando el software de estación de tierra.

Posteriormente, conectaremos el módulo de telemetría en tierra al ordenador, asegurándonos de que se haya operativo y esperando el emparejamiento con el módulo del lado aire, lo cual nos será indicado a través de un led verde fijo en dicho módulo.

Lo siguiente que deberemos hacer es conectar la emisora de radio, asegurándonos de que el control de motor se sitúa en su valor mínimo y los demás controles están centrados o en su posición neutra.

Toda vez que tengamos la emisora conectada podremos conectar tanto la alimentación principal de la Pixhawk y motor como la batería secundaria que alimenta la ranura de servos. Esto lo hacemos siguiendo el orden descrito para asegurarnos de que en el momento en que el motor queda alimentado, su señal de control se encuentra a cero, impidiendo así que factores externos como interferencias o ruidos puedan provocar una repentina puesta en marcha del motor.

6.2 Enlace Mavlink

En este punto, en el que todos los equipos están siendo ya alimentados, procedemos a realizar el enlace de telemetría entre la estación de tierra y la aeronave.

Para ello, en la parte superior derecha de la ventana principal del software nos encontramos con dos menús desplegables.

En el primero de ellos comenzando por la izquierda deberemos indicar el puerto de conexión del ordenador al cual va conectado el lado tierra de la telemetría.

En el segundo, deberemos indicar los baudios con los que trabaja nuestra conexión de telemetría.

En nuestro caso concreto seleccionaremos el puerto COM4 con una cifra de 57600 baudios.

Por último sólo nos queda presionar el botón conectar, situado en la esquina superior derecha. Una vez presionado este botón, aparecerá una ventana emergente indicándonos que se está llevando a cabo la conexión Mavlink, y se nos irá indicando que la estación de tierra, mediante este enlace de telemetría, va leyendo todos los parámetros de la aeronave y los va cargando.

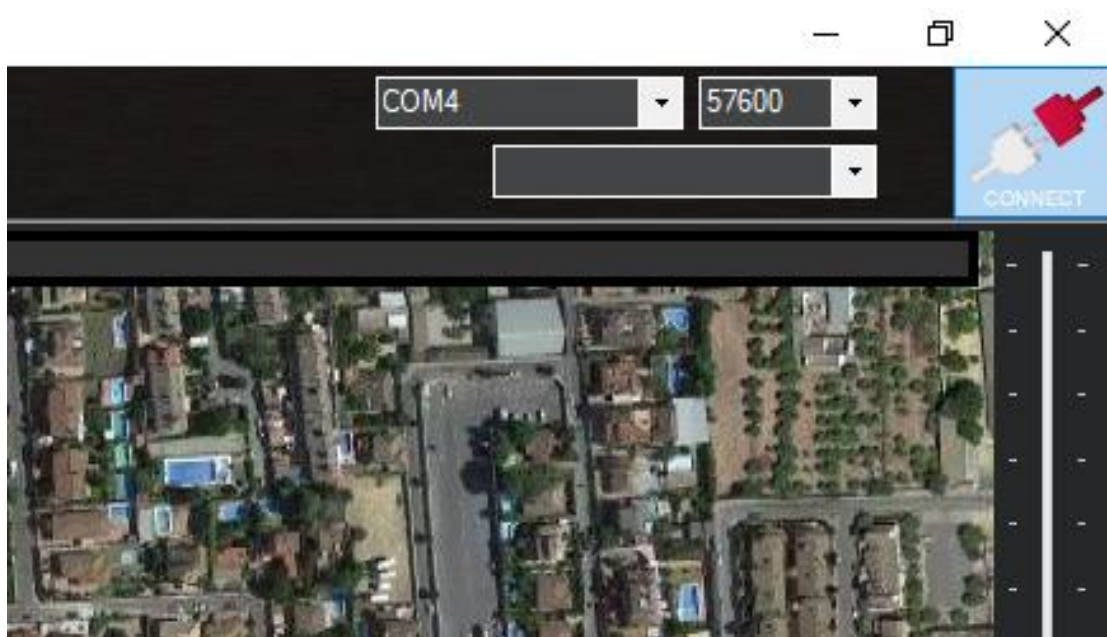


Imagen 6.2.1

6.3 Inicialización de sensores

Una vez la conexión se ha realizado, todos los sensores de a bordo comienzan a calibrarse.

Por un lado, el GPS busca satélites con los que establecer conexión. El estado en que se encuentra este proceso lo podemos ver en la esquina inferior izquierda del mapa de situación, en la pestaña de datos de vuelo de la estación de tierra. Por un lado se nos proporciona información acerca del número de satélites con el que el módulo GPS ha establecido conexión, y por otro lado se nos proporciona el valor del HDOP.

Este valor es una medida de la incertidumbre horizontal en la posición GPS debida a la calidad de la señal recibida. Valores en torno a 1 nos indicarán que la señal GPS es de buena calidad y por tanto será segura para el vuelo.



Imagen 6.3.1

Por otro lado, el magnetómetro comienza a oscilar levemente justo tras establecer la conexión, durante unos segundos, hasta que permanece estable según un rumbo determinado.

Se ha comprobado tras varias pruebas que las medidas iniciales proporcionadas por este sensor difieren de la actitud real del avión en el orden de 10-20 grados. Este problema sin embargo, se soluciona en la mayoría de las ocasiones moviendo la aeronave en tierra durante unos segundos, haciéndola cambiar de posición y orientación por la pista de vuelo, lo que hace que la indicación de rumbo pase a ser correcta con un error del orden de 1 grado aproximadamente.

Cabe destacar que este sensor es el más sensible a perturbaciones de todos los que monta la aeronave, ya que cualquier campo magnético interferirá en él.

Recordemos que el motor eléctrico genera un gran campo magnético inherente a su arquitectura, y también lo hace, en menor medida todo el cableado y piezas metálicas presentes en la aeronave.

Por último, es importante destacar que el sistema de cierre de la tapa superior del fuselaje se realiza mediante 8 imanes, dos de ellos muy próximos al módulo GPS/magnetómetro, los cuales crean también un campo magnético importante, por lo que en adelante cabría la posibilidad de sustituir dicho sistema de cierre por otro que no cause problemas a los sensores de a bordo.

En la siguiente imagen podemos ver la distribución de cada elemento dentro de la aeronave, y se puede apreciar la proximidad de dichos imanes al módulo GPS.

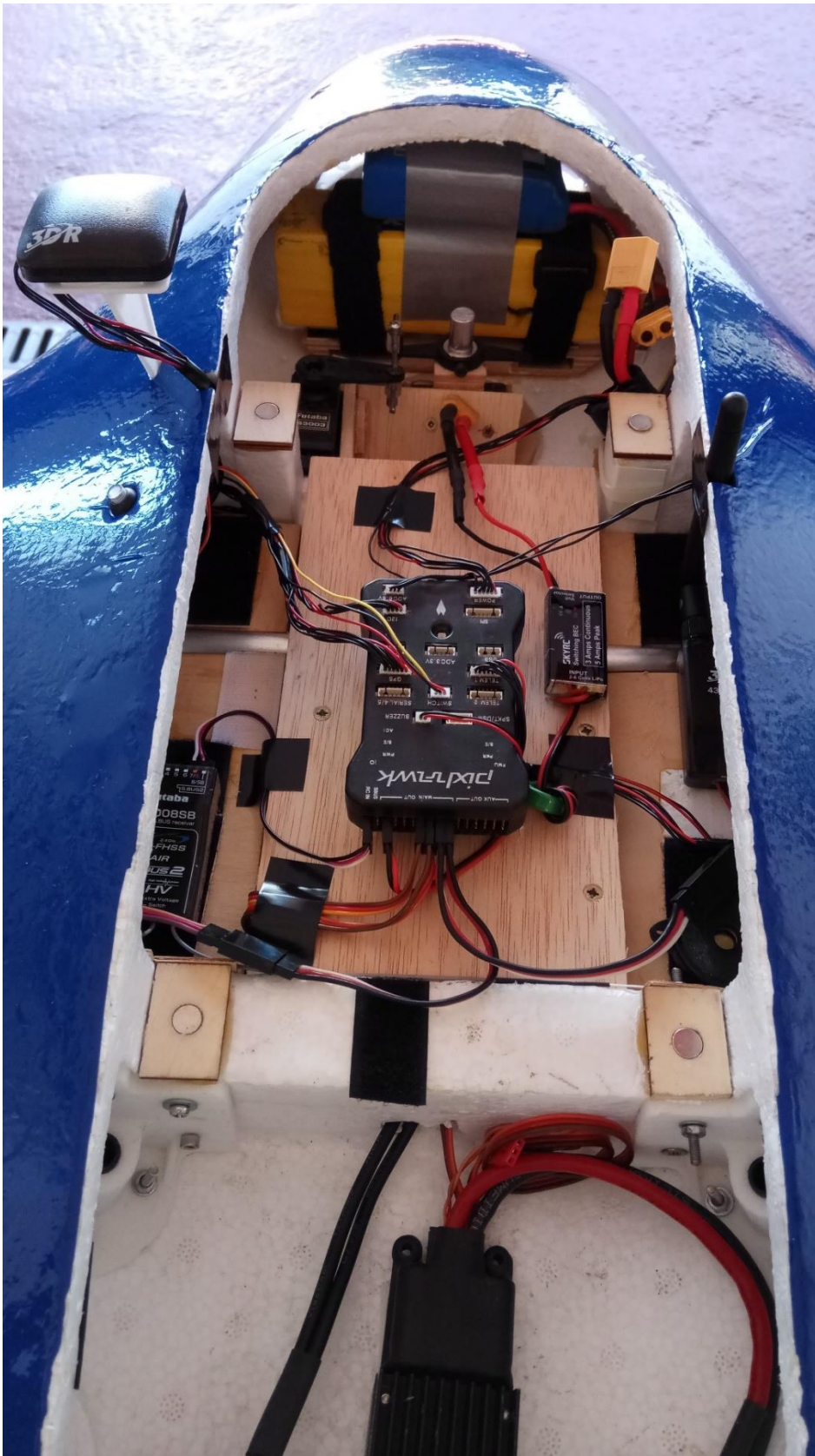


Imagen 6.3.2

Otro de los elementos que adquiere una medida inicial usada como referencia al conectar la aeronave a la estación de tierra es el barómetro interno de la controladora, que

establecerá su cero según las condiciones de presión atmosférica en el momento de la conexión, de forma que los datos de altitud mostrados serán en todo caso (por defecto) relativos al punto de inicio de la sesión de vuelo, y no respecto al nivel del mar, dato que será importante tener en cuenta.

Un último elemento clave que requerirá de una correcta inicialización es la medida de la velocidad, tanto la velocidad del aire medida por el tubo pitot, como la velocidad respecto a tierra medida por la propia controladora.

Para ello, en la pestaña acciones, de la ventana que se encuentra en la parte inferior izquierda de la pestaña datos de vuelo de la estación de tierra, encontramos una serie de menús desplegables entre los que podremos elegir diferentes opciones. Seleccionaremos en uno de ellos la opción “Preflight calibration” y, asegurándonos de que tenemos el tubo pitot protegido contra el viento, y la aeronave completamente en reposo, pulsaremos sobre el botón “Hacer acción”. Esto iniciará un proceso que llevará algunos segundos, y que establecerá el cero tanto para la velocidad del aire como para la velocidad respecto a tierra.



Imagen 6.3.3

6.4 Armado de la aeronave

Una vez todos los sensores se hayan inicializado de forma correcta, procederemos a armar la aeronave, procedimiento mediante el cual quedarán operativos tanto los servos como el motor y los diferentes modos de vuelo, por lo que podremos comenzar nuestro vuelo.

Lo primero que deberemos hacer es mantener pulsado el pulsador de seguridad, valga la redundancia, durante unos 3 segundos. Se podrá ver como la luz intermitente del pulsador queda fija.

Realizando esta acción, habrán quedado operativos todos los servos de la aeronave excepto el motor.

En este punto es importante destacar que si todos los sensores se inicializaron de forma correcta en el paso anterior, en el momento de habilitar el interruptor de seguridad, la controladora emitirá nos pitidos a través del Buzzer, y su luz principal cambiará de amarillo parpadeante a verde parpadeante, lo cual nos indicará que la aeronave se encuentra lista para armar el motor.

Si por el contrario la luz principal de la controladora no cambia en este momento, significará que algún sensor no está realizando correctamente sus mediciones o falta alguna conexión por realizar. Esto desembocará en un error que el software arrojará en el momento de armar la aeronave.

Si todo es correcto, procedemos a pulsar el botón “Arm/Disarm” en la pestaña acciones (véase la imagen 6.3.3), o podremos también mantener la palanca del timón de dirección al máximo de su recorrido hacia la derecha durante un par de segundos. En este momento la controladora hará una serie de comprobaciones de los equipos de a bordo, llamadas comprobaciones de pre armado (Pre-Arm Checks), las cuales podremos programar desde la siguiente ventana (imagen 6.3.4), que se encuentra en la pestaña de parámetros de configuración de la estación de tierra.

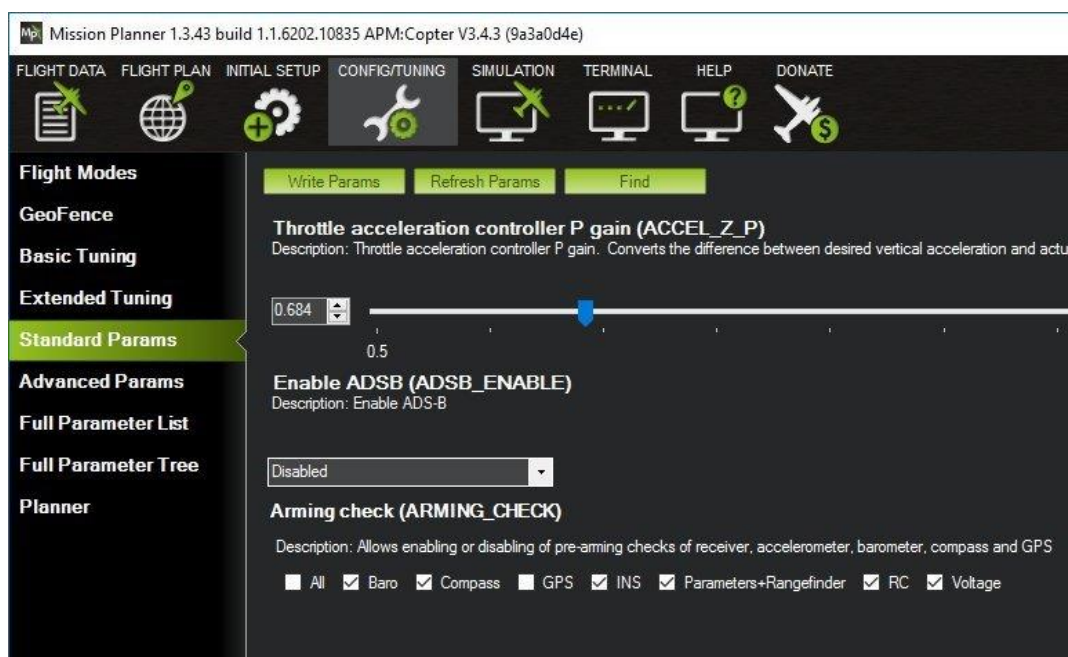


Imagen 6.3.4

Cuando la controladora comprueba que todo es correcto, se arma la aeronave, de forma que la controladora emitirá a través del Buzzer, un pitido prolongado, y su luz principal pasará a ser verde fija. Por otro lado, sobre el horizonte artificial de la estación de tierra veremos el mensaje “ARMED”.

Ahora podemos comprobar que tenemos total control sobre la aeronave, y ésta está lista para realizar el vuelo.

7. Primer vuelo de prueba: bucle abierto

7.1 Objetivo de la prueba

El objetivo de este primer vuelo de prueba es el de verificar que los sensores toman datos correctos en vuelo, que el sistema los lee e interpreta correctamente, y por último, que dichos datos se graban convenientemente en los archivos .log y por tanto podemos, una vez concluido el vuelo, acceder a ellos para interpretarlos, analizarlos y recrear el vuelo de forma virtual.

7.2 Realización de la prueba

Para llevar a cabo el vuelo deseado, se va a utilizar exclusivamente el modo de vuelo manual, con el que conseguimos el denominado bucle de control abierto, es decir, introducimos a la controladora tanto los datos de vuelo procedente de los sensores, como las señales de control proporcionadas por el piloto, pero no realimentamos con la salida que ésta nos proporciona, por lo que el piloto tiene el control de la aeronave en todo momento, pero podremos observar a posteriori, la respuesta de control del sistema en cada instante, así como los datos que fue adquiriendo en cada punto del vuelo.

Una vez finalizado el vuelo, (el cual fue corto, dibujando una figura en “ocho” sobre la pista de vuelo, ya que el único objetivo era ver de forma clara el trayecto seguido, para analizar los datos obtenidos), se procede a dicho análisis y comprobación de los datos recogidos por la aeronave, enviados y guardados en la estación de tierra en tiempo real, con el objetivo de cerciorar que todo ha salido correctamente.

Como podemos ver en el gráfico 7.2.1, correspondiente al perfil de altitud del vuelo, se ha realizado un primer ascenso tras el despegue, para luego bajar y volver a realizar un segundo ascenso, y por último la aproximación final y aterrizaje. Al ser un perfil con cambios significativos entre las distintas etapas del vuelo, nos permite comprobar que el sistema ha tomado los datos correctamente en altitud.

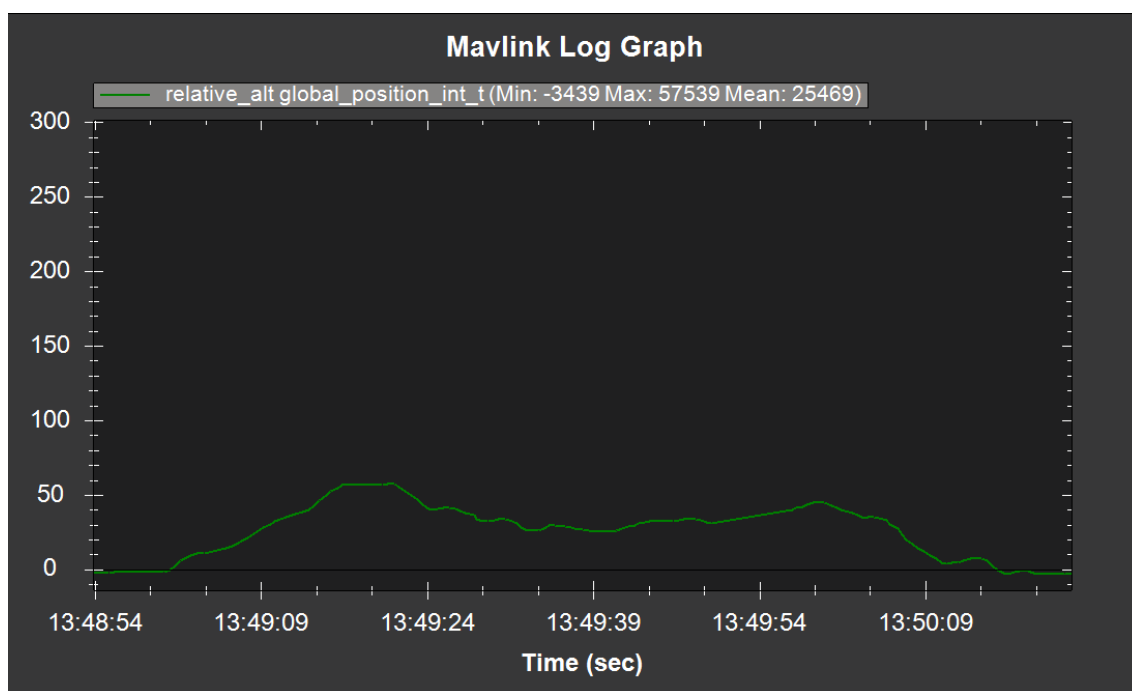


Imagen 7.2.1

Otra fuente de datos de vuelo importante es el gráfico 7.2.2, correspondiente al perfil de velocidades respecto a tierra. Puede verse como este perfil tiene una relación clara con el anterior, ya que vemos como la velocidad incrementa en los tramos de ascenso (en los cuales se ha aumentado el valor de la palanca de gases), y decrece en los tramos de bajada, los cuales se han realizado a ralentí.

Podemos ver en este gráfico, unos picos en la velocidad antes y después del vuelo, los cuales corresponden a las pruebas de rodaje en pista previas al vuelo y al rodaje posterior al aterrizaje.

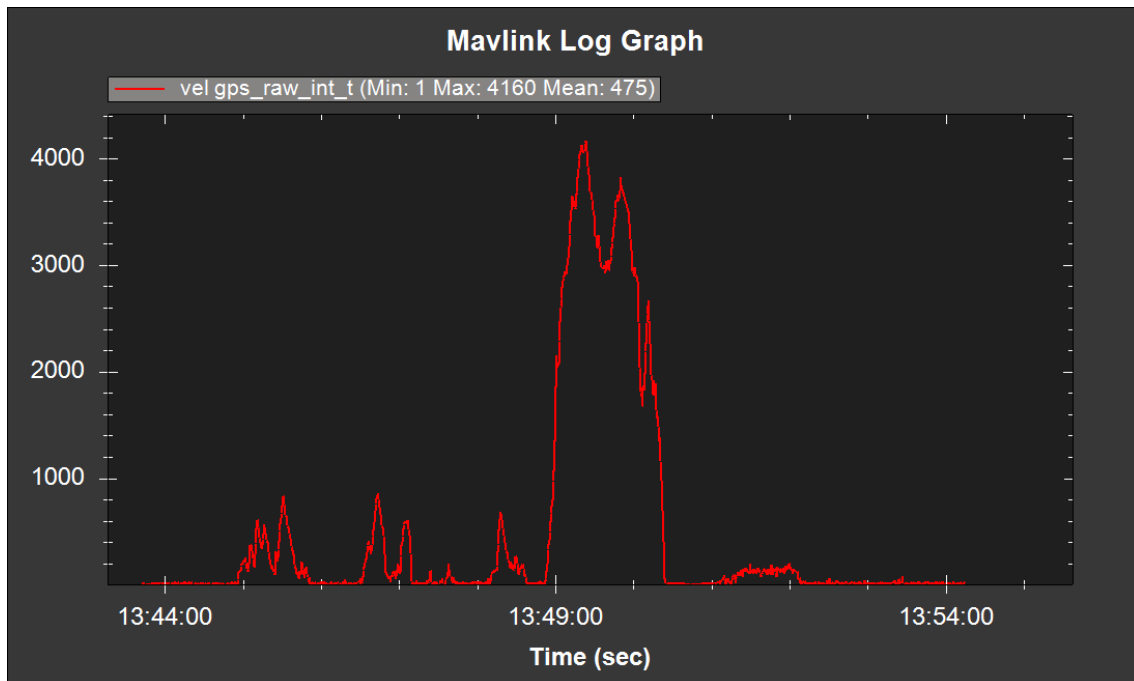


Imagen 7.2.2

Por último, procesando el archivo .kmz creado a partir del archivo .log del vuelo, podemos visualizar la trayectoria seguida por la aeronave en el entorno de Google Earth. Esta representación resulta especialmente útil en la práctica ya que mediante una única imagen nos ofrece una información completa sobre la posición de la aeronave en cada instante del vuelo, tanto en el plano como en altura, además de en qué puntos se ha realizado un envío de datos de vuelo mediante el sistema de telemetría a la estación de tierra.

Podemos observar en la imagen que hay un tramo en el que se pierde la conexión entre la aeronave y la estación de tierra, ya que se aprecia como el viraje salta de un punto a otro y el software Google Earth lo interpreta como una línea recta.

Tras analizar el entorno, se descubre que una caseta delante de la cual se situaba el ordenador portátil con la antena de telemetría hizo sombra en radiofrecuencia cuando la aeronave se encontraba, desde el punto de vista de la estación de tierra, pasando justo por detrás de dicha caseta, por lo que en vuelos sucesivos, se buscará una mejor ubicación para la estación de tierra.

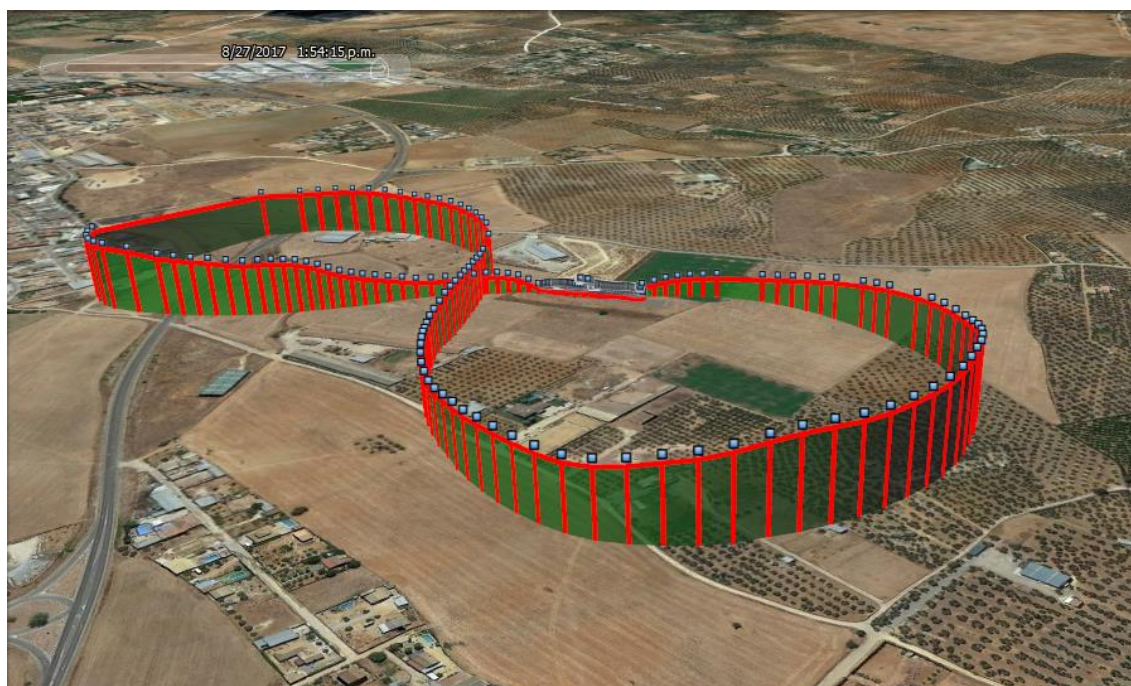


Imagen 7.2.3

8. Pruebas de vuelo en modos semiautomáticos o de navegación asistida

8.1 Vuelo en modo FBWA

Este modo nos ha permitido realizar un vuelo en el cual tenemos absoluto control sobre la aeronave, pero sin embargo, cuando no se introduce ninguna señal de control por parte del piloto, la aeronave se mantendrá nivelada en vuelo respecto al balanceo y cabeceo. Esto hace que el vuelo sea mucho más estable a la vez que seguro, ya que, además de nivelar la aeronave cuando no se introduce una señal de control por parte del piloto, la controladora tiene implementados unos ángulos máximos de alabeo y cabeceo, los cuales pueden establecerse desde la estación de tierra mediante los parámetros LIM_ROLL_CD y LIM_PITCH_MAX/MIN respectivamente, lo que asegurará que la aeronave nunca alcance valores de ángulos que puedan inducirla en un estado de entrada en pérdida o barrena, con la consiguiente pérdida de control y alto riesgo de accidente que dichas situaciones conllevan.

Cabe destacar un problema experimentado en este modo de vuelo en la fase de despegue, el cual será de aplicación en aeronaves que por la distribución de su tren de aterrizaje tengan un ángulo de cabeceo positivo al estar situadas en tierra.

Dicho problema consiste en que en aeronaves de estas características, la controladora tratará de deflectar negativamente los timones de profundidad para compensar el ángulo que tiene la aeronave en tierra, por lo que cuando el piloto introduzca una señal de control de cabeceo positiva para realizar el despegue, esta se sumará al ángulo negativo introducido por la controladora y como resultado los timones de profundidad quedarán en una posición cercana a 0 (posición neutral), lo que hará muy difícil, e incluso muy peligrosa la maniobra de despegue.

Por tanto, debe procederse al despegue mediante un control totalmente manual para posteriormente pasar al modo FBWA, para asegurar en todo momento la seguridad y operatividad de la aeronave.

En la siguiente imagen podemos ver el perfil de vuelo obtenido en esta prueba de vuelo.

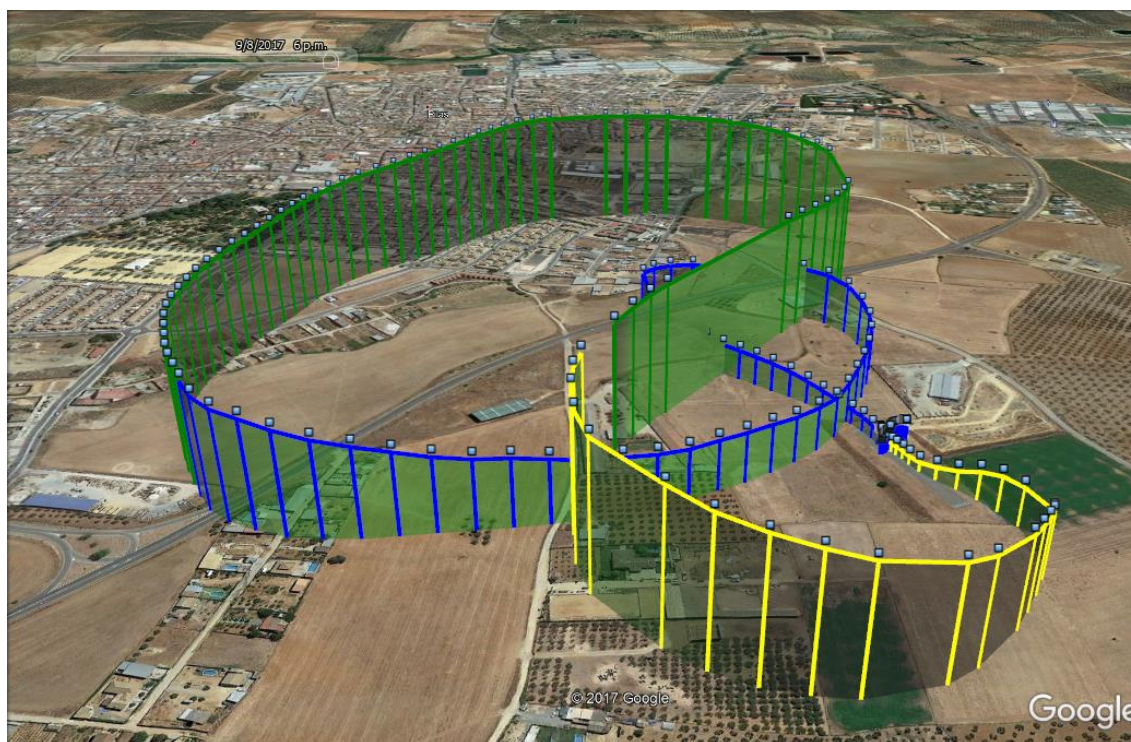


Imagen 8.1.1

En color amarillo se puede ver el primer tramo de vuelo, que se realiza en modo manual y comienza con el despegue, seguido del tramo verde, realizado en FBWA, y donde podemos ver que los movimientos en vuelo de la aeronave son considerablemente más suaves y estables, describiendo en los virajes un radio mucho más grande y uniforme del que se consigue accionando las superficies de control de forma manual. Por último, en el tramo azul se aprecia un nuevo cambio de modo a manual para la maniobra de aterrizaje.

En los siguientes gráficos podemos ver el tramo de vuelo realizado en modo FBWA, donde apreciamos, tanto para cabeceo como para alabeo, respectivamente, sendas comparaciones entre la respuesta de control que proporciona la controladora (en ángulos de deflexión de las superficies de control), y el respectivo ángulo con el que se encuentra volando la aeronave en ese instante.

A la vista de los datos, donde se ve que la controladora defleca las superficies de control un máximo del orden de los 10 grados, siendo la media del orden de 1 grado, se puede concluir que ésta hace un trabajo excelente ya que como vemos la actitud de la aeronave está en todo momento muy próxima al cero, por lo que la estabilización es máxima y la aeronave vuela de forma horizontal.

De igual manera puede observarse como antes y después de entrar en el modo FBWA, al encontrarnos volando de forma manual, la variación de los ángulos de cabeceo y alabeo de la aeronave respecto a 0 son mucho mayores, lo cual ilustra de una manera clara la utilidad de este modo de navegación asistida.

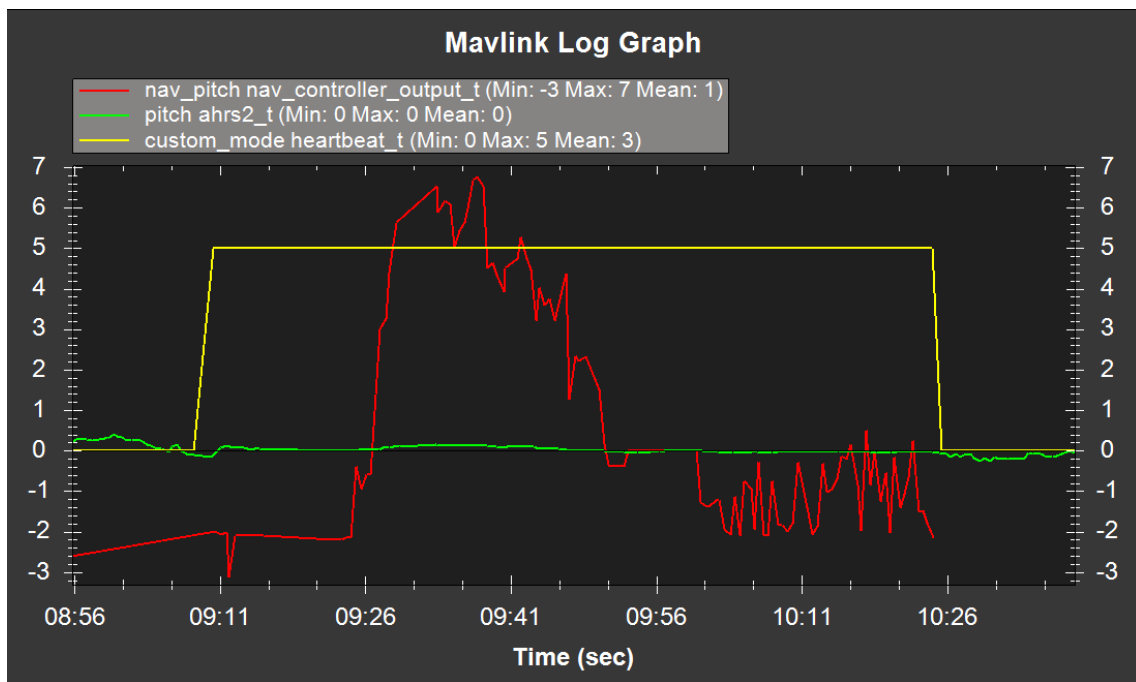


Imagen 8.1.2 (Ángulo de cabeceo de la aeronave (verde), Ángulo de deflexión de los timones de profundidad (Rojo), modo de vuelo (amarillo)).

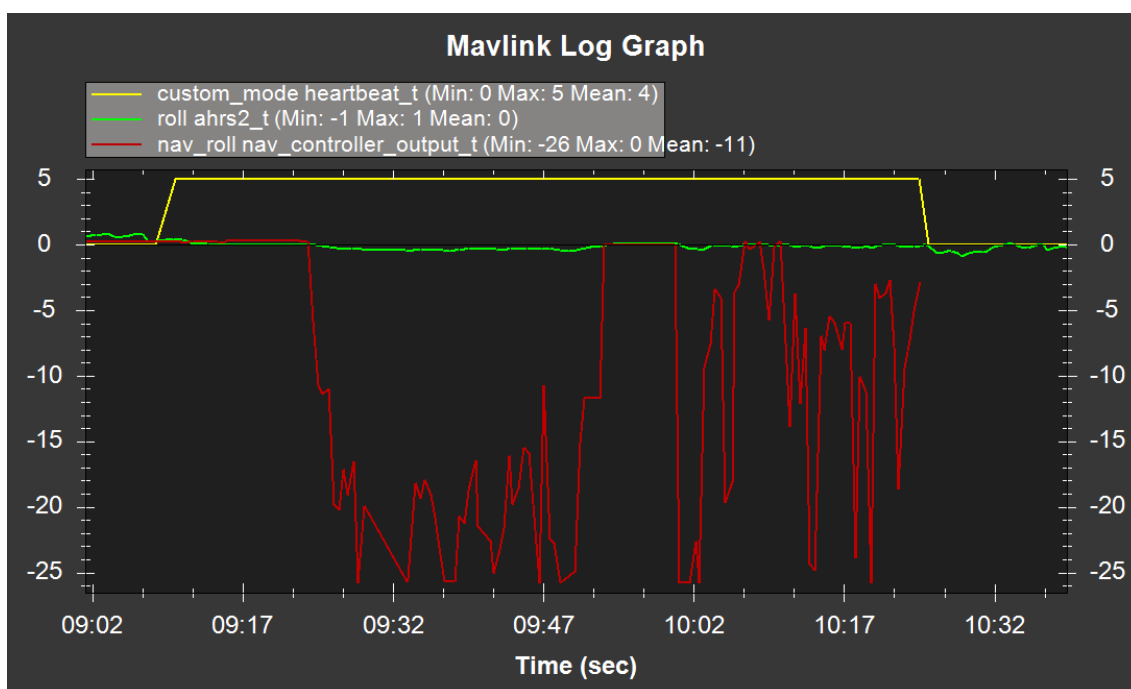


Imagen 8.1.3 (Ángulo de alabeo de la aeronave (verde), Ángulo de deflexión de los alerones (Rojo), modo de vuelo (amarillo)).

8.2 Vuelo en modo FBWB

Este modo de vuelo es en todo idéntico al anterior salvo porque el piloto no posee control directo sobre el cabeceo, sino que el mando de profundidad establecerá la altitud objetivo a la que el piloto quiere volar, y la controladora hará la combinación necesaria de acelerador y ángulo de cabeceo necesarios para alcanzar dicha actitud sin perturbar en gran medida la posición horizontal de la aeronave.

Esta modificación en la forma de operar de este modo hace que se elimine el problema que existía en el despegue con el modo FBWA, ya que al introducir el piloto la altitud objetivo mediante el mando de profundidad, cuando nos encontramos en la carrera de despegue y procedemos a realizar la rotación, le estamos comunicando a la controladora que debe aumentar la altitud de vuelo, por lo que la controladora hará la combinación necesaria de ángulo de cabeceo y aceleración para alcanzar dicho objetivo de altitud, dando como resultado un despegue suave y seguro.

En el siguiente gráfico podemos ver el perfil de altitud del despegue realizado bajo el modo de vuelo FBWB.

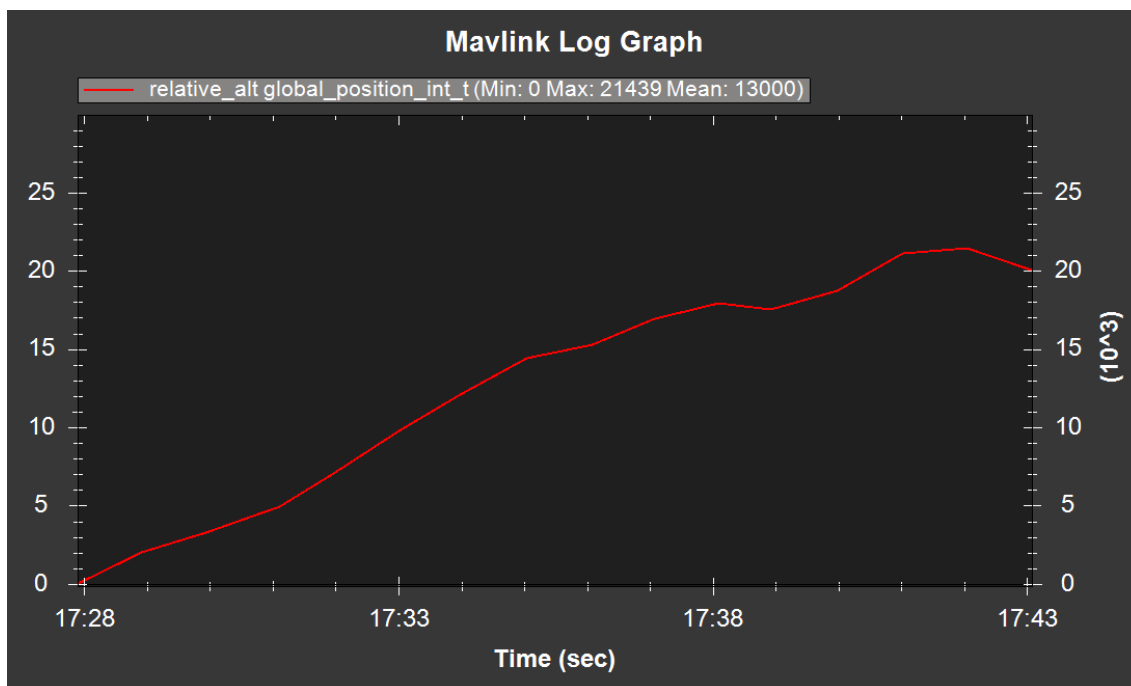


Imagen 8.2.1

8.3 Vuelo en modo Cruise

Este modo opera de manera totalmente similar al modo FBWB, pero mientras este último sólo actúa sobre los controles de cabeceo, alabeo y motor, el modo crucero lo hace también sobre el control de dirección. Para ello, este modo proyecta en cada instante un waypoint a una distancia de 1 km de su ubicación actual en la dirección de su rumbo actual, y pasa a dirigirse de forma directa a dicho waypoint. De este modo, mientras el piloto no introduzca ninguna acción de control en alabeo o guiñada, la aeronave mantendrá su rumbo, y lo cambiará cuando algunas de estas señales de control introducidas por el piloto hagan cambiar la aeronave de rumbo.

En el siguiente gráfico podemos ver cómo cada vez que se producía un cambio en el valor de guiñada (verde) o alabeo (rojo) por parte del piloto, la controladora aplicaba un cambio en la salida del canal 4 (azul), (timón de dirección), para poder tomar el nuevo rumbo. Nótese que el resto de cambios que la controladora va aplicando durante el vuelo que no se corresponden con la entrada de una orden de control, corresponden a las correcciones que el sistema realiza en todo momento para mantener el rumbo constante ante perturbaciones, como puede ser el viento.

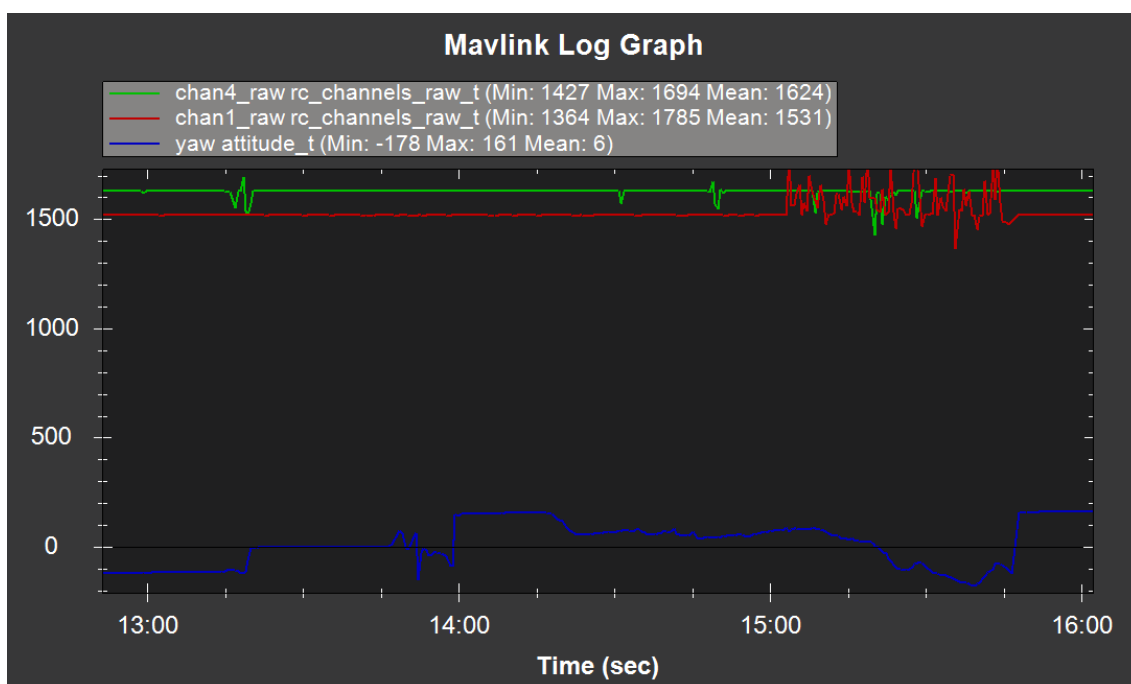


Imagen 8.3.1

9. Cambio de plataforma: de Skywalker X8 a Scottish Aviation Bulldog

9.1 Motivos

El motivo que lleva a realizar el cambio de plataforma es un accidente ocurrido durante el despegue del Skywalker X8, que pocos instantes después de abandonar el suelo, realizó un brusco movimiento de alabeo, cayendo al suelo sin posibilidad alguna de controlar la situación.

Dicha maniobra estuvo causada por el fallo en uno de los servos, concretamente el que controla la superficie móvil del ala izquierda de la aeronave, que quedó bloqueado por un fallo en su electrónica en posición de máxima deflexión positiva, causando el brusco giro de la aeronave alrededor de su eje longitudinal, en sentido contrario a las agujas del reloj, haciéndola impactar contra el suelo.

A continuación se presentan imágenes del estado de la aeronave tras el accidente, donde se puede apreciar la necesidad del cambio de plataforma debido a los daños ocasionados.



Imagen 9.1.1



Imagen 9.1.2



Imagen 9.1.3

9.2 Características de la nueva aeronave

Tras este incidente, se decide trasladar toda la aviónica y sistemas a una nueva plataforma de vuelo. La nueva aeronave es una maqueta del popular entrenador militar Scottish Aviation Bulldog, con una envergadura de 2.25m y un peso aproximado de 6kg.

Se trata por tanto de una aeronave de mayor tamaño y peso que la anteriormente utilizada, lo que, junto al diedro positivo que posee su ala baja, resultan en una aeronave más estable.



Imagen 9.2.1

La configuración de ala baja con diedro positivo y sus grandes flaps, además de hacer la aeronave muy estable, hacen que disponga de una gran sustentación durante las maniobras de despegue y aterrizaje, lo que hace estas más seguras.

A diferencia de la configuración elegida para la X8, esta aeronave presenta una hélice fija de tres palas, que permitirán aprovechar al máximo la potencia ofrecida por el motor, debido a la poca distancia existente desde el eje del motor hasta el suelo, lo que haría a una hélice de dos palas más ineficiente, ya que, como sucedía con la anterior aeronave, disponemos de un motor de gran par y bajo número de revoluciones por minuto por voltio.

En cuanto a la planta propulsora de esta aeronave, contamos con un motor Turnigy Sk3 50-55 de 430 rpm/V, movido por el mismo variador Mezon de Jetimodel usado para la X8, y alimentado con dos baterías Zippy compact de 4 celdas y 5800 mA dispuestas en serie, lo que da un total de 8 celdas a 5800 mA.

Para el accionado de las superficies de control, la aeronave cuenta con un total de 8 servos digitales de la firma HD.

9.3 Reubicación de los sistemas de aviónica

Al igual que ocurría en la X8, se ha fabricado una bancada donde anclar la base de la controladora, de forma que esta se sitúe paralela al plano que contiene a los ejes longitudinal y transversal de la aeronave.

A esta base se han acoplado todos los sistemas de aviónica, y se ha realizado un soporte para el módulo GPS, con el fin de alejar el magnetómetro en la medida de lo posible de todas las posibles fuentes de interferencia magnética.

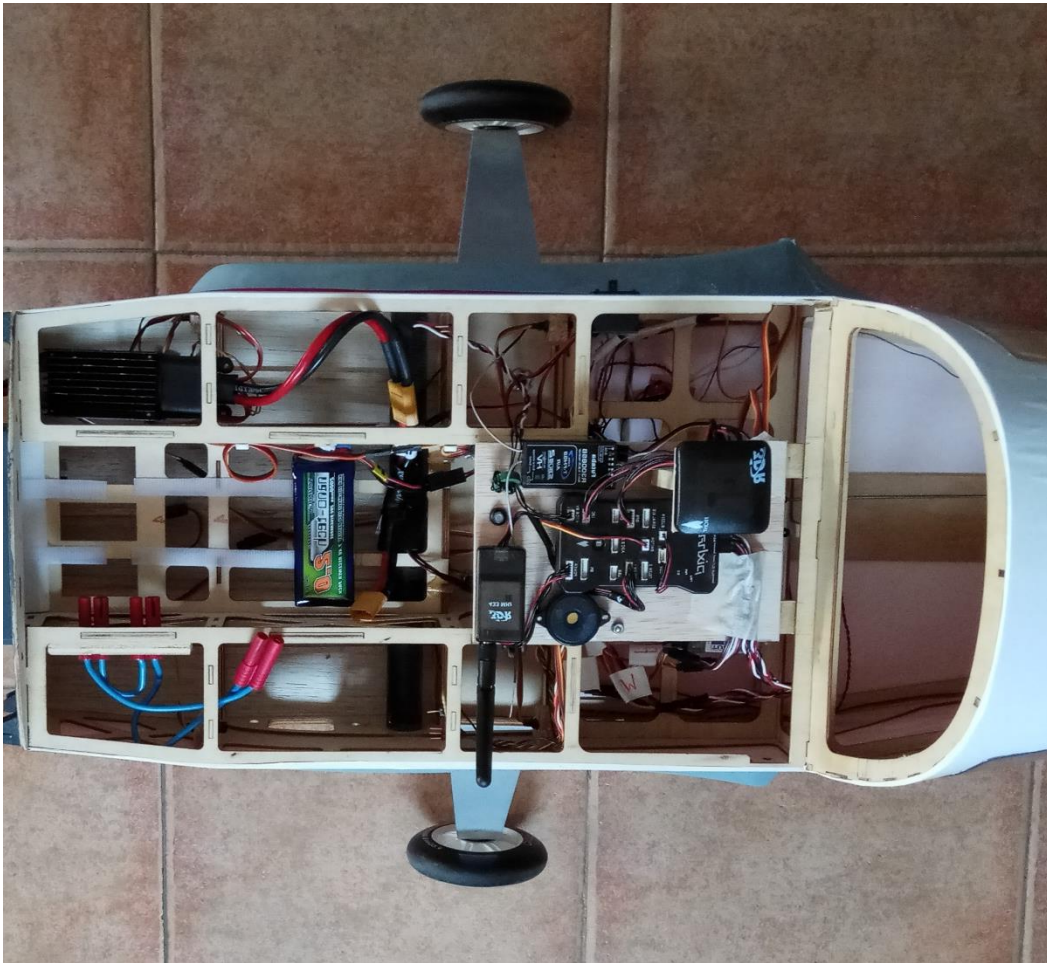


Imagen 9.3.1

9.4 Vuelo de prueba en modo FBWB

Como ocurriera con la X8, se va a realizar un primer vuelo para comprobar que todos los sistemas han sido correctamente instalados y las medidas proporcionadas por ellos son correctas, pero en esta ocasión, dicho vuelo de prueba se realizará en modo FBWB, ya que así podremos conocer también cómo responde la controladora a los movimientos de la aeronave en vuelo.

El perfil de dicho vuelo recogido en Google Earth se puede apreciar en la siguiente imagen, donde podemos ver que el sistema funciona de forma correcta, y por tanto queda listo para pasar a la fase de vuelos autónomos.

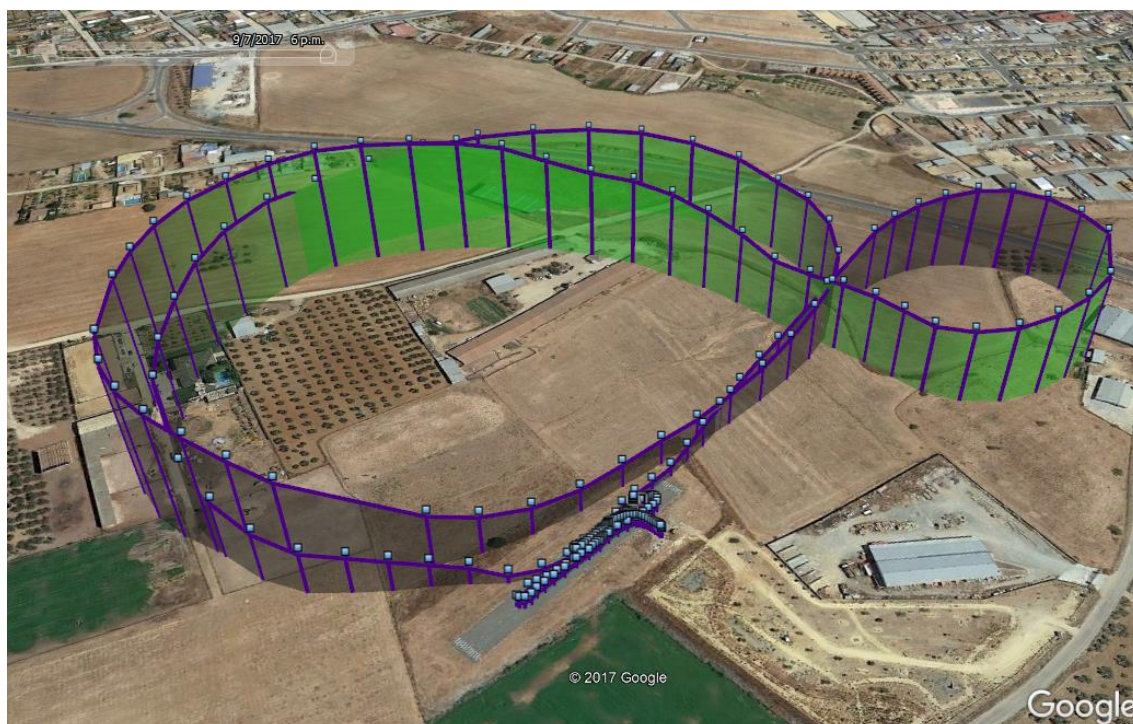


Imagen 9.4.1

9.5 Vuelo en modo Autotune

Tras el vuelo anterior, se pudo comprobar que la respuesta del sistema ante variaciones en cabeceo era correcta, pero sin embargo, la respuesta era excesivamente lenta en alabeo, teniendo que introducir manualmente un gran valor de guiñada y profundidad para que se pudiera completar el giro previo a la aproximación final que puede verse en la imagen 9.4.1, ya que de lo contrario, los virajes tomaban radios como los que se pueden apreciar en la zona izquierda de esta misma imagen.

Para corregir este fenómeno es necesario modificar los parámetros del controlador PID que gobierna el balanceo de la aeronave.

Para realizar esta función existe un modo de vuelo llamado Autotune, mediante el cual se vuela la aeronave de manera análoga a como se hace en el modo FBWA, solo que el piloto deberá transmitir movimientos de recorrido máximo a la palanca de alabeo, permaneciendo aproximadamente dos segundos en un extremo del recorrido de la palanca, y procediendo inmediatamente después a realizar la acción inversa.

Esto habrá que hacerlo de forma repetida, entre un mínimo de 10 veces y un máximo de 30 aproximadamente. Según se van sucediendo estos movimientos, la controladora va almacenando y comparando la diferencia entre los valores de deflexión de palanca y la respuesta de la aeronave, de forma que cada 10 segundos actualiza los valores P, I y D del controlador PID, por lo que el piloto irá notando como la aeronave responde cada vez de forma más precisa a los movimientos según avanza el vuelo en este modo.

En el siguiente gráfico podemos ver en amarillo los movimientos introducidos por el piloto (en grados de movimiento de las superficies de control), mientras que en azul vemos la respuesta que el sistema realiza para contrarrestar y mantener un vuelo estable y horizontal. Podemos apreciar cómo según avanzó el proceso, la respuesta del sistema es cada vez menos restrictiva (flancos de subida y bajada menos abruptos), lo que hace que la aeronave responda de forma más rápida y significativa a las órdenes de control introducidas por el piloto.

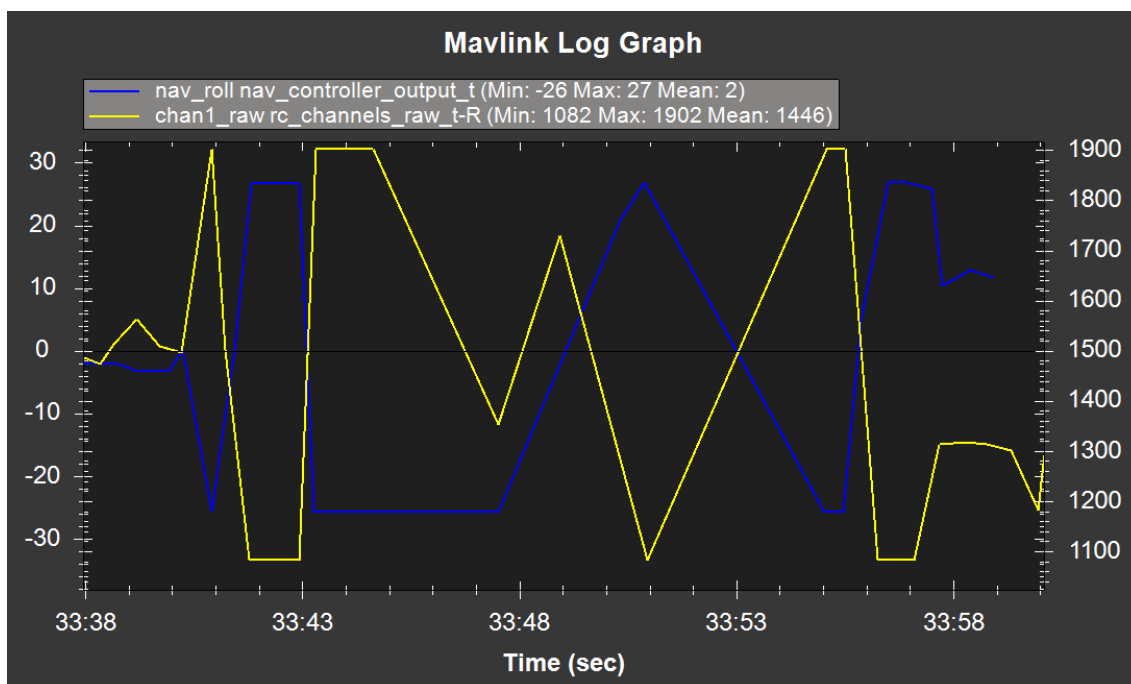


Imagen 9.5.1

10. Vuelos autónomos haciendo uso del modo AUTO, y planes de vuelo

10.1 Configuración del guiado autónomo de la aeronave en pista

Con el objetivo de poder realizar un vuelo de forma totalmente autónoma, sin que el piloto tenga que intervenir en ningún momento crítico del vuelo, como pueden ser las maniobras de despegue y aterrizaje, es preciso asegurar el correcto comportamiento de la aeronave en pista.

Para ello, existen una serie de parámetros configurables que van a permitir controlar la dirección de la aeronave mientras se encuentra en pista, asegurando así que la carrera de despegue y aterrizaje se realizaran de forma rectilínea, lo más centrada en pista posible, para evitar así que la aeronave pudiera salirse por uno de los laterales de la pista y colisionar con algún objeto.

Esta funcionalidad se controla a través de ciertos parámetros que encontramos en la pestaña config/tuning de la estación de tierra, concretamente, sólo podremos acceder a ellos si está activada la versión avanzada de esta pestaña desde las opciones de desarrollo del propio software, lo que nos permitirá acceder a la lista completa de parámetros que gobiernan el comportamiento de la aeronave, ya que de lo contrario sólo tendríamos acceso a una lista reducida donde se muestran únicamente los parámetros más comunes y utilizados por la mayoría de los usuarios.

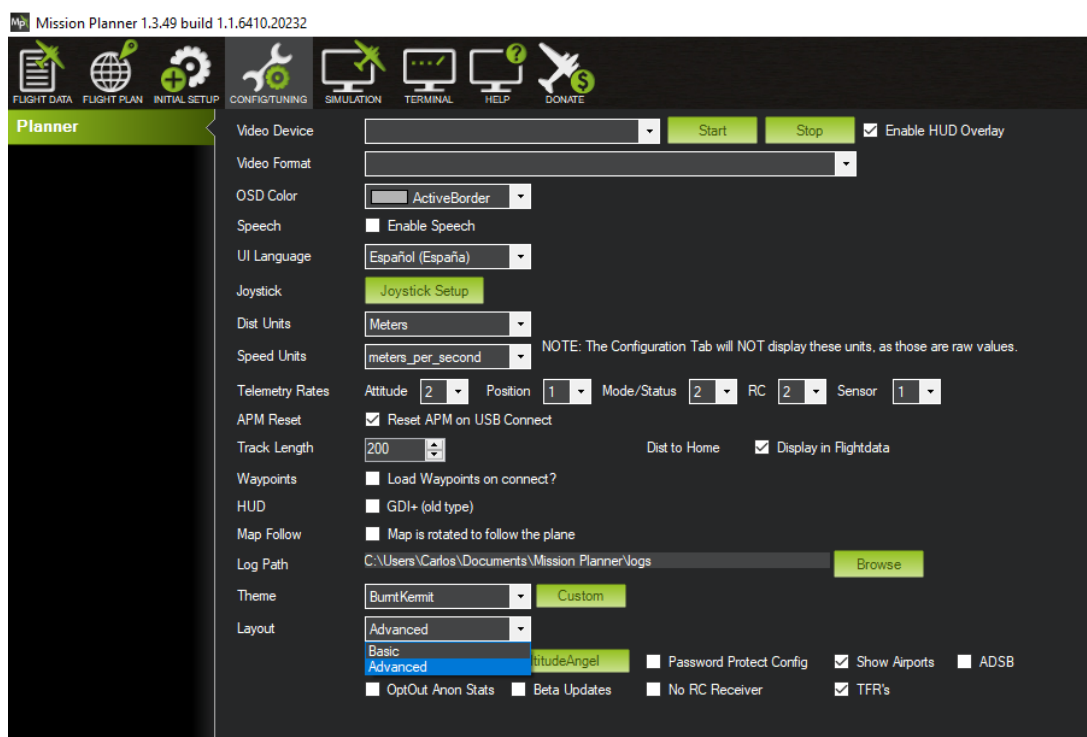


Imagen 10.1.1

El primer parámetro que deberemos tener en cuenta, y que actuará como habilitador/inhabilitador de esta opción de guiado automático en pista será el parámetro `GROUND_STEER_ALT` al cual habrá que darle un valor en metros, que corresponderá a la altitud por debajo de la cual está activo este modo, ya que por encima de la altitud fijada, el modo de guiado en pista se desconectará para dar paso al control sobre el timón de dirección de la aeronave.

Típicamente, suele establecerse este parámetro en un valor de 5 metros, para salvar posibles fluctuaciones en las medidas del barómetro de la controladora y asegurar en todo caso que la aeronave está recibiendo control en tierra sobre su dirección.

La manera en que este modo va a trabajar es fijando en cada instante el rumbo marcado por el magnetómetro, de forma que aplicará movimientos en el tren delantero direccionable con el fin de asegurar que se sigue dicho rumbo.

Si el piloto acciona manualmente el mando de dirección o alerones, la aeronave girará según lo demandado por el piloto, y cuando éste vuelva a centrar tanto el mando de dirección como el de alerones, la controladora volverá a bloquear el rumbo y tratar de mantenerlo.

El siguiente parámetro que deberá configurarse es `STEER2SRV_P` cuyo valor corresponde al diámetro, en metros, del círculo mínimo que es capaz de trazar la aeronave en pista cuando la rueda de dirección está completamente girada hacia uno de los lados. Este valor será típicamente de 4 metros aproximadamente para la mayoría de las aeronaves no tripuladas de un tamaño del orden de las aeronaves que venimos utilizando en este estudio. En concreto, para nuestra aeronave el valor se sitúa en 4.2 metros.

Se trata de un parámetro crítico para el buen funcionamiento de este sistema de control, ya que es el que le indica a la controladora que ángulo de giro debe aplicar en cada momento para conseguir el giro deseado.

El siguiente parámetro que encontramos es `STEER2SRV_I`, y se trata de la ganancia del integrador que controla el ángulo a aplicar para el direccionado de la aeronave. Un valor de 0.1 será apropiado para la mayor parte de las aeronaves.

La ganancia del derivador se controla a través del parámetro `STEER2SRV_D`, que en la práctica controla la sensibilidad del bucle de control ante vibraciones o pequeños movimientos. Si aumentamos demasiado el valor de esta ganancia, tendremos una oscilación de alta frecuencia en la rueda de dirección, ya que el sistema tratará de corregir cada una de las desviaciones de la posición neutral que el sistema experimente. Sin embargo, un valor muy bajo de este parámetro hará que el sistema no responda hasta que la desviación del vehículo respecto al rumbo fijado sea elevada. Un valor de 0.02 será apropiado para la mayor parte de las aeronaves.

El siguiente parámetro, llamado `STEER2SRV_IMAX` limita el ángulo que la controladora podrá hacer girar al servo que controla la rueda de dirección. Su valor debe ser introducido en centésimas de grado, y por defecto se sitúa en 1500, lo que significa que el servo podrá moverse desde su posición neutra un máximo de ± 15 grados. Este valor representa un tercio del recorrido máximo del servo, que será típicamente de ± 45 grados, lo que ofrecerá un control de dirección adecuado a menos que la aeronave se encuentre muy mal trimada en el canal de dirección, lo cual conviene corregir de forma mecánica en la transmisión del servo.

El parámetro `STEER2SRV_MINSPD` establece una velocidad respecto a tierra mínima para que se active el sistema. Esto será útil mientras se rueda a velocidades muy lentas para situar la aeronave en cabecera de pista, ya que en este caso no sería de utilidad el modo de bloqueo de rumbo al tener que dirigir la aeronave a través de una ruta que no tendrá por qué ser una línea recta.

El siguiente y último parámetro que deberemos configurar se refiere al tiempo, en segundos, que deberá tardar la controladora en llevar la aeronave del rumbo actual al rumbo deseado, es decir, controlará el tiempo máximo de respuesta de control permitido. Este parámetro se denomina STEER2SRV_TCONST y para aeronaves de ala fija tendrá un valor de 0.5 típicamente.

10.2 Creación de un plan de vuelo para llevarse a cabo de forma completamente autónoma

Se decide realizar un circuito simple, que no contenga giros demasiado cerrados ni maniobras que pudieran poner en peligro la seguridad de la aeronave, como podrían ser también tramos a gran altitud o sobrevuelo de áreas de riesgo, como zonas urbanas o superficies de agua.

En concreto, se realiza un circuito con forma de cero, compuesto por dos tramos aproximadamente rectos (uno de ellos conteniendo a la pista de aterrizaje, para albergar ambas maniobras de despegue y aterrizaje), en los que la aeronave volará con ángulos de alabeo cercanos a cero, y dos amplios tramos curvos.

Debido a las condiciones meteorológicas del día en que se realizó el vuelo, durante el cual el viento soplaba de forma muy suave con algunas rachas moderadas, aproximadamente alineado con la pista, de este a oeste con una leve componente sur, el modo de vuelo del circuito será en sentido contrario a la agujas del reloj, asegurando así que tanto el despegue como el aterrizaje se realizarán de cara al viento, lo cual aumentará la sustentación al tener una velocidad mayor respecto al aire.

En la siguiente imagen podemos ver los waypoints situados en el mapa para la creación de la ruta, donde se aprecia que el software establece una ruta a tramos rectos entre cada uno de los waypoints, lo cual será imposible de seguir para una aeronave de ala fija, por lo que veremos como en los tramos suficientemente largos, el controlador irá oscilando a ambos lados de la ruta hasta situar la aeronave sobre ella.

Nótese que los waypoints 1, 10, y 11 no aparecen en el mapa. Esto es debido a que llevan asignadas diferentes acciones que veremos a continuación, y por tanto no son puntos de paso como tal. El waypoint 12, aunque lleva asociada la acción aterrizaje si es un punto de paso, ya que representa el lugar del espacio donde queremos que la aeronave tome tierra, por tanto si aparecerá representado en el mapa.

También aparecerá el punto “Home” ya que, aunque este punto no está incluido dentro de la ruta de vuelo, es importante que el piloto sepa en todo momento donde se encuentra ya que será el punto que la aeronave sobrevolará en caso de tener que realizar una maniobra de vuelta a casa de emergencia, en la cual la aeronave se dirigirá al punto “Home” a una altitud previamente configurada por el piloto, y permanecerá volando sobre dicho punto en círculos de un radio también dado de forma previa por el piloto.

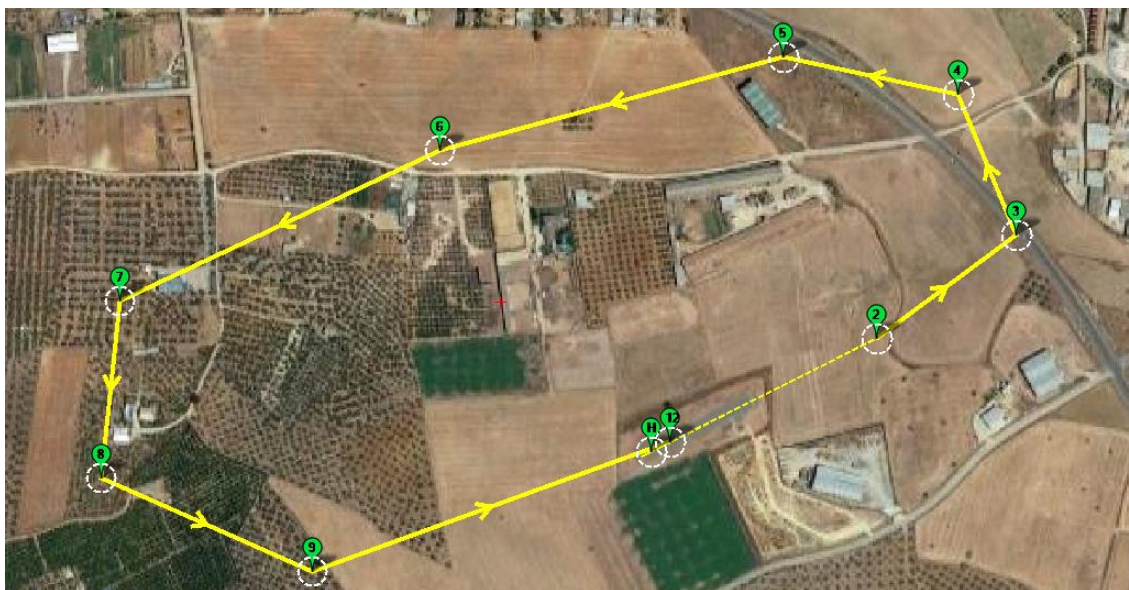


Imagen 10.2.1

A la hora de planificar la ruta de vuelo, no sólo deberemos ir posicionando puntos de paso en el mapa, sino que deberemos asignar diferentes acciones a cada uno de esos puntos excepto a aquellos que efectivamente vayan a ser considerados únicamente puntos de paso, a los que sólo deberemos introducirles dos parámetros; la altura a la cual debe pasar la aeronave por dicho punto, y el radio de aceptación del punto, es decir, el radio del área circular que al ser sobrevolada por la aeronave dará el waypoint en cuestión por alcanzado, y por tanto la aeronave pasará a volar hacia el siguiente.

El punto número uno será asignado a la acción TAKEOFF (despegue), e irá situado en el extremo contrario de la pista al cual se colocará la aeronave.

Los puntos 2 a 4 serán puntos de paso a una altura de 40 metros sobre la pista de vuelo.

Los puntos 5 a 7 serán puntos de paso a una altitud de 50 metros sobre la pista de vuelo.

Los puntos 8 a 12 irán reduciendo la altitud de paso en 10 metros cada uno de ellos. De estos puntos, el 8 y 9 serán puntos de paso, sin embargo, el punto 10 tendrá asignada la acción de reducir la velocidad de vuelo respecto al aire a 10 metros por segundo, lo que supondrá el inicio de la aproximación final.

Poco después de pasar por el punto 10, el punto 11 tendrá asignada la acción de comenzar la maniobra de aterrizaje, mediante la cual la aeronave extenderá los flaps y bajará el motor a ralentí.

Por último el punto 12 será el punto LAND (aterrizaje), que será donde la aeronave deberá tomar tierra para posteriormente desarmar el motor una vez esté parada en la pista.

Waypoints															
Radio WP	Radio Perder	Tiempo	por Defecto	Relative	Verify Height	Agregar Abajo	Alt Warn	Spline							
15	80	50					1								
	Comandos	Acc radiu	Pass by		Lat	Long	Alt	Borrar	Arrib	Abajo	Grad %	Angle	Dist	AZ	
1	TAKEOFF	0	0	0	0	37,297314	-6,313266	4	X		0	0	0	0	
2	WAYPOINT	0	0	0	0	37,297911	-6,311178	40	X		15,4	8,8	257,4	63	
3	WAYPOINT	0	0	0	0	37,298842	-6,310186	40	X		0,0	0,0	174,9	54	
4	WAYPOINT	0	0	0	0	37,30013	-6,310862	40	X		0,0	0,0	155,2	337	
5	WAYPOINT	0	0	0	0	37,300455	-6,312847	50	X		5,6	3,2	179,5	282	
6	WAYPOINT	0	0	0	0	37,29961	-6,316752	50	X		0,0	0,0	358,0	255	
7	WAYPOINT	0	0	0	0	37,298244	-6,3204	50	X		0,0	0,0	356,6	245	
8	WAYPOINT	0	0	0	0	37,29664	-6,320615	40	X		-5,6	-3,2	179,6	186	
9	WAYPOINT	0	0	0	0	37,295782	-6,318217	30	X		-4,3	-2,5	232,8	114	
10	DO_CHAN...	0	10	0	0	37,296358	-6,315819	20	X		0	0	0	0	
11	DO_LAND...	0	0	0	0	37,296384	-6,315604	10	X		0	0	0	0	
12	LAND	0	0	0	0	37,296964	-6,314124	0	X		-7,8	-4,5	386,3	70	

Imagen 10.2.2

Una vez tenemos el plan de vuelo completamente definido, lo primero que debemos hacer es guardar el archivo de la ruta para poder cargarla en cualquier momento.

En el momento de comenzar el vuelo, conectaremos nuestra aeronave a la estación de tierra mediante el enlace MAVLINK de telemetría.

Una vez conectada, desde la pestaña de plan de vuelo, teniendo cargada la ruta, procederemos a escribir la ruta en la memoria de la aeronave. Volviendo a la pestaña de datos de vuelo deberemos ver que ha aparecido la ruta sobreimpresionada en el mapa, lo cual nos indicará que la carga se ha realizado correctamente.



Imagen 10.2.3

Posteriormente, tras la inicialización de todos los sensores de la aeronave y tras activar el interruptor de seguridad, procedemos a armar el motor y dejar por tanto la

aeronave lista para el vuelo. Una vez esto haya sido realizado, desde la pestaña acciones de la estación de tierra, elegiremos en el primero de los desplegable la opción MISSION_START y pulsaremos sobre el botón “Hacer acción”. En este momento la aeronave debe comenzar a realizar su misión, comenzando la maniobra de despegue.

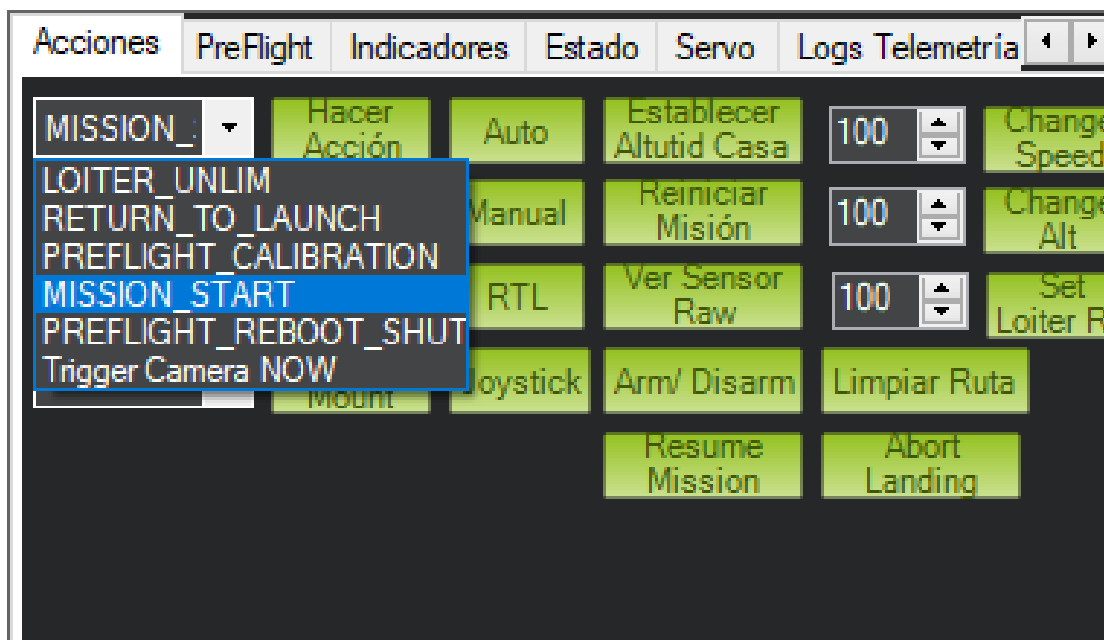


Imagen 10.2.4

Mientras la aeronave pasa por todas las etapas del vuelo, desde tierra nos mantenemos revisando la estación de tierra comprobando que todo está correcto, aunque siempre vigilando la aeronave en visión directa por si algo fuera mal y tuviéramos que retomar el control manual de la misma en caso de tener que evitar un posible accidente.

Una vez la misión ha terminado, podemos observar la diferencia entre la ruta planificada y la ruta llevada a cabo por la aeronave.

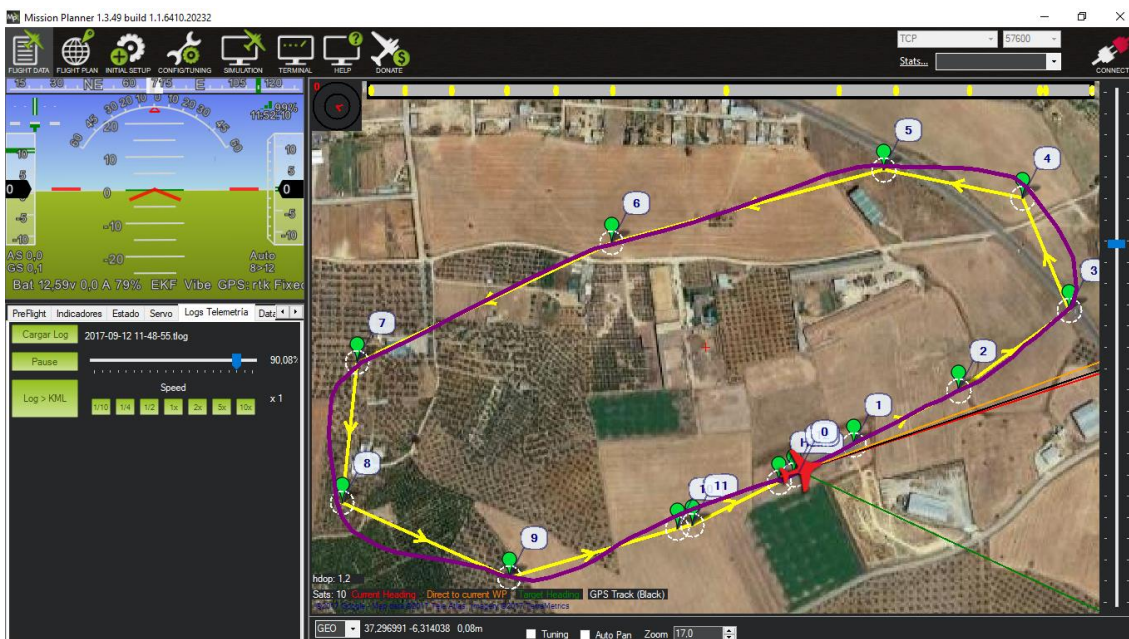


Imagen 10.2.5

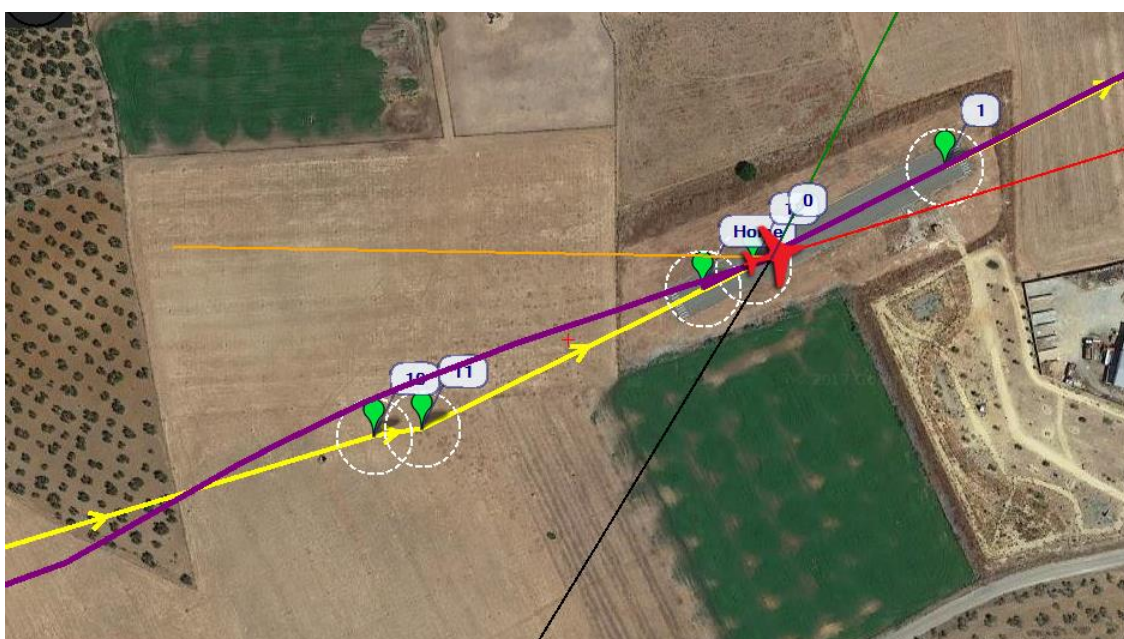


Imagen 10.2.6

En la imagen de detalle 10.2.6 se puede apreciar como el despegue se realiza según la trayectoria planeada, sin apenas desviación, lo que nos indica que el proceso de guiado de la aeronave en pista se realizó de forma totalmente satisfactoria.

Por otro lado, podemos ver que en el tramo de aproximación final, la ruta seguida por la aeronave se desvía levemente de la planificada hacia el norte, debido a que en este último tramo la aeronave se encontraba descendiendo a ralentí y hubo una racha de viento moderada de sureste, la cual causó la desviación producida.

En la siguiente imagen se muestra el perfil de vuelo visualizado en Google Earth, donde podemos ver cómo la ruta seguida por el avión ha sido bastante fiel a la planificada. Vemos por ejemplo como en todo el tramo de la ruta asignado a una altitud de 50 metros, ésta se mantiene constante, por lo que podemos concluir que la controladora hace un gran trabajo en su modo automático.

Donde sí podemos observar que hay una incongruencia entre lo planificado y lo que ha sucedido en la realidad es en la maniobra de despegue, ya que por seguridad, ésta se ha programado a un nivel de motor del 100%, para asegurar que la aeronave abandona el suelo de forma rápida, para evitar así posibles problemas en la transición tierra-aire, que a menudo se antoja el tramo más peligroso de un vuelo en modo automático. Debido a esto, cuando la aeronave alcanza el waypoint 2, cuya altitud estaba establecida en 40 metros, la aeronave lleva una altitud de aproximadamente 70 metros, por lo que realiza un descenso a partir de ese momento para situarse a los 40 metros planificados.



Imagen 10.2.7

10.3 Aplicaciones del vuelo autónomo de plataformas RPAS

Sin duda en este estudio se ha podido comprobar el gran potencial que tienen las plataformas RPAS pilotadas de forma asistida y sobre todo de forma autónoma para diferentes tareas que están en auge en los últimos tiempos.

Ya se trate de plataformas de ala fija, como ha sido el objeto de este estudio, o plataformas tipo multirrotor, estamos ante una tecnología capaz de poner al alcance del hombre tareas que antes de la llegada de este tipo de vehículos eran impensables bien por su elevado coste, bien por el peligro en que incurrían.

Hablamos de tareas como la fotogrametría o la elaboración de mapas de ultra alta definición, para la cual se usan aeronaves RPAS de ala fija, las cuales, volando en modo automático recorren una ruta planificada mediante waypoints tomando fotografías cada

pocos metros de distancia recorrida o cada pocos segundos, fotografías que mediante software especializado pueden fusionarse para crear una imagen de gran tamaño de todo el terreno sobrevolado por la aeronave. Esta tarea se hace inviable mediante el uso de aeronaves tripuladas debido al alto coste que conlleva, pero sobre todo debido al riesgo de volar una aeronave tripulada de gran tamaño a una distancia muy cercana al suelo. Asimismo, sería imposible realizar esta tarea con un RPAS pilotado manualmente desde tierra, ya que el piloto perdería rápidamente contacto visual con la aeronave, haciendo imposible el vuelo, o muy complicado aunque no imposible en caso de usar un sistema FPV (vista en primera persona).

De esta misma forma hay otras muchas actividades que se encuentran en la misma situación y que actualmente o próximamente serán realizadas mediante aeronaves no tripuladas de vuelo autónomo. Algunas de estas actividades pueden ser la vigilancia de fincas, el rodaje de escenas de cine, la monitorización de ciertos ecosistemas o especies animales en libertad, el reparto de mercancías procedentes del ecommerce a particulares, etc.

11. Conclusiones finales

La puesta a punto de una aeronave para su correcto funcionamiento y vuelo, lleva asociadas numerosas tareas que deberán ser realizadas de forma exhaustiva y con un gran control, ya que un pequeño fallo en tierra puede desembocar en una gran catástrofe durante un vuelo. Por ello, durante este estudio se ha tratado de mantener la aeronave en las mejores condiciones, introduciéndole todas las mejoras tanto estructurales, como hardware y software necesarias, con el fin de alcanzar el éxito en las pruebas de vuelo realizadas.

En el aspecto software, el trabajo necesario para encontrar cada uno de los parámetros que modifica cada una de las funciones de la controladora es tedioso y duro, a la vez que útil y de gran potencial, ya que permite un control total sobre la aeronave, permitiendo implementar funciones de alta complejidad a la misma.

En lo que respecta al vuelo autónomo de la aeronave, es un modo que requiere de un alto conocimiento de parámetros y arquitectura de controladores, lo que hace que una mala calibración o timing de los controladores PID, que gobiernan la actitud de la aeronave en vuelo, pueda llevar a un comportamiento inestable de la aeronave. Por ello, se ha prestado especial atención al uso del modo AUTOTUNE, consiguiendo unos valores en los parámetros de los PID adecuados para nuestra aeronave, en lugar de los valores por defecto que implementa la controladora, los cuales, aunque aseguran un vuelo

relativamente seguro para casi cualquier aeronave, hacen que éste sea impreciso e ineficiente.

Glosario

RPAS: “Remotely Piloted Aircraft System” - Aeronave pilotada de forma remota

Waypoint: Punto de paso. Referido a los puntos en el mapa mediante los cuales el piloto define desde la estación de tierra donde comenzará y terminará cada tramo de una ruta.

Trimado: Ajuste fino del ángulo de deflexión de las superficies de vuelo o tren direccional respecto de cero en su estado neutro o de reposo.

Armado de la aeronave: Estado por el cual la controladora activa la salida que proporciona control sobre el motor o motores de la aeronave.

Enlace Mavlink: “Micro Aircraft Vehicle Link” - Protocolo de comunicación para aeronaves no tripuladas de pequeño tamaño

Bloqueo GPS: Estado por el cual la posición del vehículo queda totalmente definida por el módulo GPS.

Bibliografía

Web oficial del proyecto Ardupilot: ardupilot.org/plane

Proyecto final de carrera que antecede a este trabajo:

Autor: Benito Fernández Rojas

Título: Desarrollo de un avión no tripulado: construcción, integración de sistemas y ensayos en vuelo.

Web oficial del proyecto Pixhawk: pixhawk.org

Comunidad on line de UAVs DiY Drones: diydrones.com

Imágenes de componentes de avión: hobbyking.com

