



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Integración y Configuración de Sistemas de un UAV de Vuelo Autónomo

Autor: Yasin Vincent El-Shohoumi

Curso: 2024-2025

Tutor: Federico Martín de la Escalera

Convocatoria: Enero 2025

(Esta página ha sido dejada intencionadamente en blanco.)

Agradecimientos

Deseo dedicar las primeras palabras de este proyecto a mi querida Blanca, quien como siempre, ha sido mi principal apoyo durante este intenso año, en el que las exigencias del trabajo y el estudio han dejado poco lugar para el descanso.

Quiero dedicar también un profundo pensamiento a mi difunta madre, cuya influencia sigue siendo una guía constante en mi vida y una motivación para esforzarme en cada paso que doy.

Agradezco también a los amigos y compañeros que han jugado un papel clave en hacer que pueda considerar 2024 un gran año. Entre ellos, merece una especial mención mi amigo y compañero Antonio.

Doy gracias a mi tutor Federico por su guía y apoyo durante el desarrollo de este proyecto, así como por haberme hecho descubrir un área que hacía tiempo despertaba mi interés.

Finalmente, me agradezco a mi mismo el esfuerzo y la perseverancia que me han llevado a estar hoy donde estoy. Con este proyecto pongo fin a una larga, intensa y feliz etapa de mi vida, y doy comienzo a una nueva etapa de “cosecha”.

A todos, gracias.

(Esta página ha sido dejada intencionadamente en blanco.)

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Contexto y motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos del proyecto	1
1.3. Estructura del documento y metodología de trabajo	2
2. Marco teórico	5
2.1. Introducción a los vehículos aéreos no tripulados	5
2.1.1. Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados	6
2.2. Arquitectura de un sistema de vuelo autónomo multirroto	9
2.2.1. Descripción del segmento aire	10
2.2.1.1. Célula	10
2.2.1.2. Autopiloto y aviónica	11
2.2.1.3. Carga de pago	12
2.2.2. Descripción del segmento tierra	13
2.2.2.1. Estación de control en tierra	13
2.2.2.2. Unidad de recepción y monitorización de señal de video	14
2.2.2.3. Emisora de radio y control manual	14
2.3. Arquitectura de un UAV basado en CubePiot y PX4	15
2.3.1. Firmware PX4	16
2.3.2. Autopiloto Cube Orange	18
2.3.2.1. Salidas PWM	19
2.3.2.2. Puertos periféricos	20
2.3.2.3. Sensores integrados	20
2.3.3. Sistema de radiocontrol y telemetría Herelink	21
2.3.3.1. Unidad de aire	21
2.3.3.2. Controlador remoto	22
2.3.4. Estación de control en tierra QGroundControl	23
2.3.5. GPS Here3+	24
2.3.6. Sistemas de energía y distribución eléctrica	25
2.3.6.1. Baterías	25
2.3.6.2. DC/DC	25
2.3.6.3. Unidad de distribución de potencia	26
2.3.7. Sistemas de propulsión	26

2.3.7.1.	Controladores electrónicos de velocidad	26
2.3.7.2.	Motores	27
2.3.7.3.	Hélices	28
3.	Integración y configuración de sistemas	29
3.1.	<i>Layout</i> de componentes e integración en la aeronave	30
3.1.1.	Bloque de controlador de vuelo	32
3.1.1.1.	Instalación del Cube Orange	32
3.1.1.2.	Instalación del GPS Here3+	32
3.1.1.3.	Instalación de la unidad de aire Herelink	33
3.1.1.4.	Instalación del zumbador	34
3.1.2.	Bloque de potencia	36
3.1.3.	Bloque de propulsión	37
3.2.	Configuración de sistemas en QGroundControl	40
3.2.1.	Actualización del firmware	40
3.2.2.	Selección del <i>airframe</i>	41
3.2.3.	Calibración de sensores	42
3.2.3.1.	Calibración de la brújula	42
3.2.3.2.	Calibración del giroscopio	44
3.2.3.3.	Calibración del acelerómetro	44
3.2.4.	Configuración de radio	46
3.2.5.	Configuración de modos de vuelo	48
3.2.6.	Configuración de la unidad de potencia	50
3.2.7.	Configuración de actuadores	51
3.2.8.	Parámetros	54
4.	Vuelo en campo	56
4.1.	Modos de vuelo en QGroundControl	56
4.1.1.	Modos manuales	56
4.1.2.	Modos autónomos	57
4.2.	Pruebas de vuelo manual y comprobaciones previas al vuelo autónomo	57
4.3.	Planificación y ejecución de misiones de vuelo autónomo	60
4.4.	Problemas detectados y soluciones implementadas	66
5.	Análisis y conclusiones	69
5.1.	Conclusiones principales del proyecto	69
5.2.	Propuestas de mejora y líneas de investigación futuras	70

Índice de figuras

2.1. "Teleautomaton" de Nikola Tesla.	6
2.2. Teledyne Ryan YQM-98	7
2.3. General Atomics Predator	8
2.4. DJI Matrice 600	8
2.5. Distintas configuraciones de UAVs multirroto.	10
2.6. Autopiloto comercial UAV Navigation Vector 600	11
2.7. Carga de pago Phase One P3.	12
2.8. Estación de control de tierra.	13
2.9. Controles típicos de un mando radiocontrol.	15
2.10. Diagrama de bloques de PX4.	17
2.11. Diagrama de bloques del autopiloto Cube Orange.	19
2.12. Puertos del autopiloto Cube Orange.	20
2.13. Unidad de aire del Herelink.	22
2.14. Controlador remoto del Herelink.	23
2.15. Unidad de aire y RTK Here3+	24
2.16. Batería de 4 celdas utilizada.	25
2.17. ESC utilizado en el proyecto.	27
2.18. Motor utilizado en el proyecto.	27
2.19. Hélices utilizadas en el proyecto.	28
3.1. Esquema de conexiones del ecosistema CubePilot.	31
3.2. Conexión del GPS Here3+.	32
3.3. Conexión de la unidad de aire Herelink.	33
3.4. Conexión del zumbador.	34
3.5. Foto de la plataforma metálica con los sistemas del controlador de vuelo.	35
3.6. Foto de la plataforma metálica con los sistemas del bloque controlador de vuelo.	35
3.7. Conexión eléctrica del bloque de potencia.	36
3.8. Conexión eléctrica del bloque de propulsión.	37
3.9. Foto del conexionado eléctrico del grupo propulsor.	38
3.10. Foto del conexionado eléctrico del grupo propulsor.	38
3.11. Foto de la base del hexacóptero.	39
3.12. Foto del montaje de la plataforma propulsora.	39
3.13. Foto del hexacóptero ensamblado.	40

3.14. Actualización del firmware en QGroundControl	41
3.15. Selección del <i>airframe</i> en QGroundControl	42
3.16. Selección de orientación para la calibración de la brújula en QGroundControl.	43
3.17. Calibración de la brújula en QGroundControl.	43
3.18. Calibración del giroscopio en QGroundControl.	44
3.19. Selección de la orientación del autopiloto en QGroundControl.	45
3.20. Calibración del acelerómetro en QGroundControl.	45
3.21. Emparejamiento de la unidad de aire Herelink con la estación terrestre.	47
3.22. Calibración de los <i>joysticks</i> de la emisora de radio Herelink.	47
3.23. Pasos 1 y 2 de la configuración de botones del Herelink.	49
3.24. Paso 3 de la configuración de botones del Herelink.	49
3.25. Pasos 4, 5 y 6 de la configuración de botones del Herelink.	50
3.26. Configuración de las batería en QGroundControl.	51
3.27. Definición de la geometría y posición de motores en QGroundControl.	52
3.28. Asignación de salidas PWM a motores en QGroundControl.	53
3.29. Ajuste del rango de señal PWM y testeo de motores en QGroundControl.	54
3.30. Parámetros modificados durante la configuración de sistemas.	55
4.1. Ajuste del parámetro "center stick is zero throsttle" en Herelink.	58
4.2. Ajuste del <i>joystick</i> exponencial en Herelink.	59
4.3. Selección de la visión de planificación en QGroundControl.	60
4.4. Vista de planificación en QGroundControl.	61
4.5. Interfaz de planificación de misiones en QGroundControl.	62
4.6. Punto de despegue en la planificación de misión en QGroundControl.	63
4.7. Puntos de paso en la planificación de misión en QGroundControl.	64
4.8. Vuelta al punto de despegue en la planificación de misión en QGroundControl.	64
4.9. Edición de parámetros en la planificación de misión en QGroundControl.	65
4.10. Cargar una misión a un vehículo en QGroundControl.	65
4.11. Errores detectados en la aeronave.	66
4.12. Error <i>crash dump</i> de la aeronave.	67

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y motivación del proyecto

Este proyecto nace del interés del autor por explorar y comprender la arquitectura y el funcionamiento de los UAV multirrotor en un contexto donde los vehículos no tripulados tienen cada vez más cabida. De este modo, el proyecto representa una oportunidad para introducirse en el vasto mundo de los sistemas UAV, combinando un interés personal por su operación en aplicaciones recreativas y cinematográficas con una motivación profesional orientada al desarrollo de tecnologías avanzadas. La experiencia previa del autor en integración de sistemas, pruebas de vehículos y validación de soluciones técnicas ha sido un factor clave en la elección de este tema, proporcionando una base sólida para afrontar los desafíos del proyecto.

Asimismo, el acceso a equipos y sistemas de alto valor tecnológico disponibles en la escuela ha sido un elemento determinante para embarcarse en este trabajo. Este entorno ha permitido al autor profundizar en el aprendizaje sobre integración y configuración de sistemas UAV en un ámbito hasta ahora poco explorado, consolidando su experiencia en un área de creciente relevancia tecnológica y profesional. Por otro lado, el interés por los UAV en aplicaciones autónomas radica en su capacidad de operar con mínima intervención humana, permitiendo al usuario centrar sus esfuerzos en otras tareas y aumentar la eficiencia operativa de una misión específica.

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es diseñar, integrar y validar un sistema UAV multirrotor capaz de realizar vuelos autónomos de manera eficiente y segura. Para cumplir con este propósito, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar e implementar la integración de todos los subsistemas necesarios para el vuelo autónomo, asegurando una estructura aeronáutica sólida y funcional.

2. Configurar y calibrar todos los componentes del sistema, incluyendo sensores, controladores de vuelo y actuadores, con el fin de garantizar que la aeronave pueda armarse sin errores ni fallos operativos.
3. Realizar vuelos en modo manual, ajustando iterativamente los parámetros de control hasta lograr una operación estable y confiable bajo el control directo del usuario.
4. Conseguir un vuelo estacionario autónomo, manteniendo la estabilidad del UAV en ausencia de intervención del usuario, como paso previo al desarrollo de misiones más complejas.
5. Diseñar y ejecutar una misión de vuelo autónomo basada en una ruta definida mediante puntos de navegación (*waypoints*).
6. Asegurar que el UAV complete la misión planificada de manera exitosa sin incidentes ni daños en la aeronave.

Estos objetivos proporcionarán una hoja de ruta para alcanzar el objetivo global del proyecto. Al finalizar el documento, se realizará una evaluación de los objetivos previamente establecidos, analizando si se han cumplido en su totalidad y, en caso contrario, identificando los problemas y limitaciones que hayan impedido su consecución.

1.3. Estructura del documento y metodología de trabajo

La estructura del documento está ideada para ofrecer un recorrido lógico y completo a lo largo del desarrollo del proyecto, desde los conceptos teóricos iniciales hasta la evaluación final del sistema implementado.

El segundo capítulo introduce los fundamentos teóricos relacionados con los UAV y sus sistemas principales, proporcionando el contexto técnico necesario para comprender el desarrollo del proyecto. Además, se describen en detalle todos los subsistemas utilizados, incluyendo sus características y roles específicos dentro del sistema a integrar.

En el tercer capítulo se detalla el proceso de integración y configuración de los subsistemas, abarcando aspectos como el conexionado eléctrico de los componentes, la integración del hardware en la estructura del UAV y la configuración del software. Este apartado también funciona como un manual de instrucciones para la instalación y configuración de un UAV que utilice componentes similares a los empleados en este proyecto.

El cuarto capítulo engloba las actividades realizadas una vez que la aeronave ha sido configurada y armada sin errores. Se detalla el proceso de pruebas de vuelo, incluyendo un marco teórico sobre los diferentes modos de vuelo y las instrucciones para operar en cada

uno. Además, se describen los problemas encontrados durante las pruebas, las soluciones implementadas y los ajustes realizados para mejorar la operación de la aeronave. Finalmente, se expone la misión de vuelo planificada y se analiza si se logró completarla con éxito.

Finalmente, en el quinto capítulo se resaltan los logros alcanzados y los aspectos que requieren mejora. Asimismo, se incluyen las conclusiones del proyecto y se sugieren posibles líneas de trabajo futuro, con el objetivo de ampliar las capacidades del sistema y optimizar su desempeño en aplicaciones similares.

La metodología de trabajo de este proyecto se estructuró en cuatro fases principales:

1. En la primera fase, se realizó una recopilación de información para comprender la arquitectura de los UAV basados en controladores de vuelo de código abierto, incluyendo el estudio de las características técnicas de los componentes seleccionados y estableciendo así una base teórica sólida para el resto del desarrollo.
2. La segunda fase se enfocó en la integración eléctrica de los sistemas en la aeronave. Durante esta etapa, se conectaron y ensamblaron los diferentes componentes del sistema, garantizando tanto la funcionalidad eléctrica como la estabilidad mecánica de la aeronave, clave para resistir las tensiones en vuelo.
3. La tercera fase consistió en la configuración del software. Se utilizó el firmware PX4 y el software QGroundControl como herramienta principal para la configuración de los subsistemas, ajustando parámetros críticos y realizando pruebas de funcionamiento en vacío (sin carga).
4. Finalmente, en la cuarta fase, se llevaron a cabo pruebas de vuelo para validar el sistema en condiciones reales. Este proceso incluyó iteraciones continuas para identificar problemas, ajustar parámetros y optimizar el comportamiento de la aeronave.

De manera paralela al desarrollo de las actividades del proyecto, se ha llevado a cabo la redacción del presente documento, incorporando los conocimientos adquiridos a lo largo del proceso, con el objetivo de proporcionar un registro detallado y estructurado de actividades.

(Esta página ha sido dejada intencionadamente en blanco.)

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción a los vehículos aéreos no tripulados

Un UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*, por sus siglas en inglés), también conocido como vehículo aéreo no tripulado o dron, es una aeronave que vuela sin un piloto humano a bordo. Estos dispositivos pueden ser controlados de forma remota desde una estación en tierra o volar de manera completamente autónoma utilizando sistemas avanzados de navegación y control.

La clasificación de los UAV se basa en diversos parámetros técnicos, como alcance, altitud operativa, autonomía y peso máximo al despegue (MTOW). En términos de diseño, los UAV actuales se clasifican principalmente en dos categorías: ala fija y ala rotatoria. Los UAV de ala fija están optimizados para operaciones de largo alcance y alta velocidad, mientras que los de ala rotatoria son ideales para misiones que requieren maniobrabilidad y despegues verticales. Los UAV de ala fija presentan diversas geometrías, desde alas convencionales hasta configuraciones de ala delta o blended-wing-body (BWB). Los UAV de ala rotatoria incluyen helicópteros o multirrotores, ciclogiros, autogiros y girodinos.

Un UAV consta de varios subsistemas interdependientes. La plataforma aérea incluye sistemas de propulsión, navegación y control de vuelo, mientras que la carga útil varía según la misión. La estación de control terrestre (GCS) supervisa las operaciones, incluyendo planificación de misión, gestión de carga útil y distribución de datos a través de enlaces.

Las aplicaciones de los UAV abarcan un amplio espectro. En el ámbito militar, son utilizados para reconocimiento, vigilancia, designación de objetivos y combate directo, así como para misiones navales y antisubmarinas. En el ámbito civil, destacan usos en agricultura de precisión, rescates, monitoreo ambiental o fines cinematográficos.

2.1.1. Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) tienen sus orígenes estrechamente vinculados al desarrollo de la aviación tripulada. Pioneros como Cayley, Ninomiya, Du Temple, Langley y Cody construyeron las primeras aeronaves no tripuladas. Aunque ninguno de ellos es reconocido como el creador definitivo de este concepto, todos contribuyeron significativamente al desarrollo inicial de la aviación no tripulada. Nikola Tesla introdujo en 1898 el concepto de un vehículo controlado remotamente, el "Teleautomaton", considerado el primer torpedo de la historia y que sirvió como precursor de los actuales misiles de crucero y UAV militares. Durante la Primera Guerra Mundial, los avances tecnológicos permitieron el desarrollo de UAV funcionales, como el Curtiss-Sperry Aerial Torpedo, diseñados para realizar misiones autónomas básicas basadas en mecanismos de navegación primitivos.

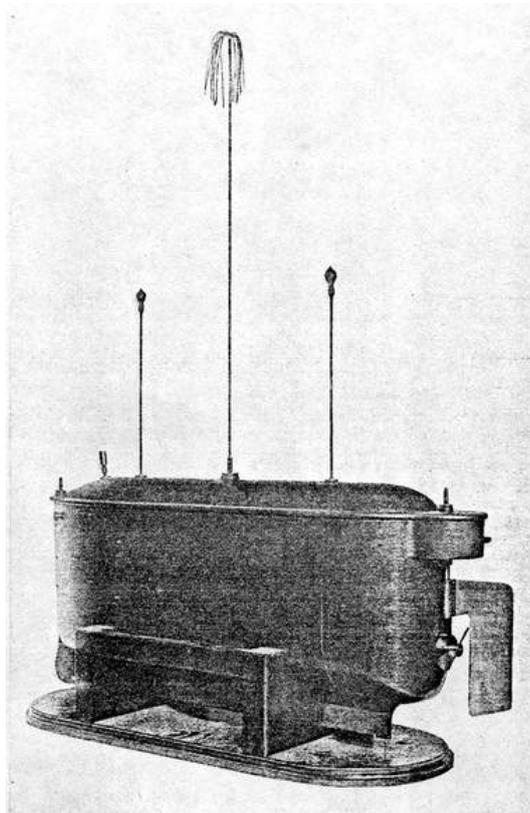


Figura 2.1: "Teleautomaton" de Nikola Tesla.

Fuente: www.cyberneticzoo.com

Durante la Segunda Guerra Mundial, los UAV desempeñaron un papel destacado como blancos aéreos y sistemas de armas de largo alcance. En Alemania, el "V-1", también conocido como "Fieseler Fi 103", fue uno de los primeros misiles de crucero en ser operado a gran escala, con un motor pulsorreactor y sistemas de guiado barométricos. Al mismo tiempo, los aliados desarrollaron UAVs como el "Queen Bee" en el Reino Unido, utilizado para entrenamiento de artillería, y el Radioplane RP-4 en Estados Unidos. Estos diseños

implementaban transmisores y receptores de radiofrecuencia para controlar el vuelo, marcando el inicio de la transición hacia sistemas de control remoto más fiables. La posguerra vio el desarrollo de UAVs más avanzados, como el Ryan Firebee, utilizado tanto como blanco aéreo como para misiones de reconocimiento, con mejoras significativas en autonomía, velocidad y altitud operativa.

La Guerra Fría impulsó un desarrollo acelerado de los UAVs como herramientas esenciales para el reconocimiento estratégico. Los sistemas HALE (High Altitude Long Endurance) y MALE (Medium Altitude Long Endurance) comenzaron a tomar forma durante este periodo. Ejemplos destacados incluyen el Boeing YQM-94 y el Teledyne Ryan YQM-98, los cuales lograron récords de altitud y autonomía, estableciendo las bases para UAVs modernos como el Global Hawk. Estos UAVs eran controlados desde estaciones terrestres mediante enlaces de comunicación satelitales, ampliando significativamente su rango operativo. Paralelamente, surgieron innovaciones en vehículos más pequeños y versátiles, como el IAI Scout y el Tadiran Mastif, que adoptaron configuraciones innovadoras como hélices propulsoras y doble cola en "V".



Figura 2.2: Teledyne Ryan YQM-98

Fuente: www.wikipedia.com

Con la miniaturización de la electrónica y los avances en sistemas de navegación y comunicación, los UAV comenzaron a diversificarse en las décadas de 1980 y 1990. La introducción del Predator, desarrollado por General Atomics, marcó un hito en la integración de sensores avanzados y armamento en un solo sistema. Estos UAVs ofrecían capacidades tanto de vigilancia como de ataque, lo que los convirtió en herramientas clave en conflictos bélicos modernos.



Figura 2.3: General Atomics Predator

Fuente: www.wikipedia.com

En la actualidad, los drones se integran en aplicaciones comerciales y gubernamentales con un enfoque creciente en la automatización y la autonomía gracias a la reducción de costes y el aumento de la accesibilidad tecnológica. Los sistemas avanzados de "ver y evitar" (*sense and avoid*) han permitido su uso en entornos más complejos y densos, como áreas urbanas. Asimismo, los desarrollos en inteligencia artificial han abierto nuevas posibilidades, como el seguimiento autónomo de objetivos en movimiento o la detección de patrones en grandes volúmenes de datos capturados por UAV.



Figura 2.4: DJI Matrice 600

Fuente: www.dji.com

Los avances recientes en materiales ligeros, diseños biomiméticos y tecnologías de propulsión han ampliado las capacidades de los UAV, permitiendo mayor autonomía y efi-

ciencia. El mercado global de UAVs continúa creciendo, impulsado tanto por demandas militares como por aplicaciones comerciales emergentes. La investigación actual se centra en mejorar la confiabilidad, reducir costes operativos y desarrollar UAVs capaces de realizar misiones completamente autónomas. En el futuro, se espera que los drones desempeñen un papel aún más importante en determinados sectores. La logística aérea podría ser revolucionada mediante drones de carga autónomos, capaces de transportar mercancías a largas distancias. En la seguridad pública, los drones podrían integrarse en sistemas de vigilancia automatizados o actuar como primeros mecanismos de rescate en emergencias.

2.2. Arquitectura de un sistema de vuelo autónomo multirrotor

El UAV multirrotor es un caso particular de UAV cuyo principio de vuelo se basa en un sistema de hélices de paso fijo y velocidad variable unido a una estructura central o *airframe*. En el núcleo del sistema se encuentra el controlador de vuelo, que actúa como el cerebro del dron, procesando datos de diversos sensores y ejecutando algoritmos de control para mantener la estabilidad y seguir trayectorias predefinidas.

Los sensores integrados en el sistema proporcionan información esencial sobre la posición, orientación y entorno del multirrotor. Entre los más comunes se encuentran las unidades de medición inercial (IMU), que combinan acelerómetros y giroscopios para detectar movimientos en múltiples ejes. Además, se emplean magnetómetros para determinar la dirección respecto al campo magnético terrestre, barómetros para medir la altitud y receptores GPS para obtener datos de posición geográfica. En entornos donde la señal GPS es limitada o inexistente, se pueden utilizar sistemas de visión por computadora o sensores de flujo óptico para la navegación.

La comunicación entre el multirrotor y la estación de control en tierra es fundamental para la supervisión y control del vuelo. Esta se realiza mediante enlaces de radiofrecuencia que transmiten datos de telemetría, comandos de control y, en algunos casos, video en tiempo real. En aplicaciones avanzadas, se pueden emplear redes celulares o satelitales para ampliar el alcance y la fiabilidad de la comunicación.

El software de control de vuelo, conocido como autopiloto, es responsable de interpretar los datos de los sensores y ejecutar las acciones necesarias para mantener la estabilidad y seguir las rutas planificadas. Sistemas como ArduPilot o PX4 son ejemplos de software de código abierto ampliamente utilizados en la comunidad de UAVs. Estos sistemas permiten la implementación de diversos modos de vuelo, desde manual hasta completamente autónomo, y ofrecen la flexibilidad de adaptarse a diferentes configuraciones y misiones.

2.2.1. Descripción del segmento aire

El segmento aire en un sistema UAV multirrotor comprende todos los elementos que se encuentran integrados en la aeronave para llevar a cabo su operación. Este segmento incluye la célula o estructura portante, el sistema de propulsión, los sistemas de aviónica y control, y la carga útil asociada.

2.2.1.1. Célula

La célula de los multirrotores se compone del cuerpo central, los brazos, el grupo propulsor y el tren de aterrizaje. Esta configuración les transfiere una muy buena estabilidad permitiendo el vuelo estacionario y el vuelo de alta precisión. Sin embargo, esta clase de UAVs carecen de la autonomía de vuelo de los UAV de ala fija debido a que requieren de una transferencia continua de potencia a los rotores para su sustentación.

- Fuselaje: el cuerpo central del fuselaje de un multirrotor tiene la función de servir como estructura portante de todos los elementos de la planta de potencia, los sistemas de autopiloto, la aviónica y la carga de pago. Los brazos, en cambio, soportan los motores, las hélices, y en ocasiones, los controladores electrónicos.
- Grupo propulsor: a diferencia de los UAVs de ala fija, en los UAVs multirrotor no se emplean elementos estructurales fijos para generar sustentación, sino hélices o rotores. El control direccional de la aeronave se realiza únicamente mediante la variación de velocidad relativa de cada uno de ellos.

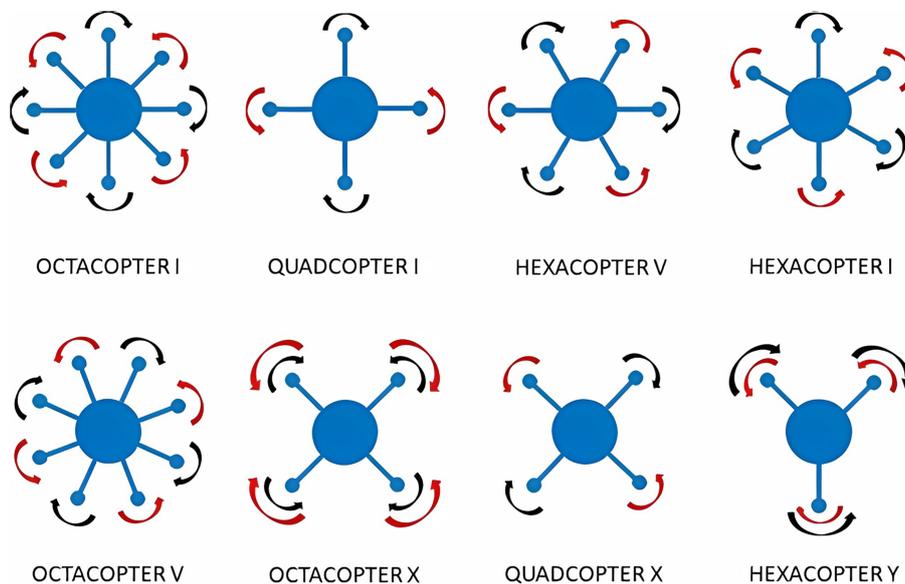


Figura 2.5: Distintas configuraciones de UAVs multirrotor.

Fuente: *Inspection of aircrafts and airports using UAS: A review, 2024*

Las hélices de un multirrotores están dispuestas de forma simétrica respecto del eje de alabeo de la aeronave y siempre suman un número par debido a la necesidad intrínseca de las aeronaves de ala rotatoria de compensar el momento generado por el giro de los rotores.

En la figura 2.5 se muestran las principales configuraciones de multirrotores que se pueden encontrar actualmente en el mercado.

- Tren de aterrizaje: el tren de aterrizaje de un multirrotores está compuesto en la mayoría de los casos de dos patines de aterrizaje situados en la parte inferior del cuerpo central.

2.2.1.2. Autopiloto y aviónica

La centralita de control y la aviónica de un multirrotores se compone de los sistemas electrónicos necesarios para el control de la aeronave, las comunicaciones con el segmento tierra y la navegación.



Figura 2.6: Autopiloto comercial UAV Navigation Vector 600

Fuente: www.uavnavigation.com

Existen infinidad de sistemas de aviónica que pueden ir embarcados en un UAV en función de las necesidades y el objetivo de la aeronave. Sin embargo, los principales sistemas que se pueden encontrar en la mayoría de aeronaves no tripuladas son:

- Autopiloto: actúa como el núcleo del sistema de control, gestionando la estabilización de la aeronave, la navegación autónoma, el control del grupo propulsor y la comunicación con el segmento tierra.

- Sistemas de comunicación: compuesto principalmente por antenas y receptores de radio y telemetría de carácter bidireccional.
- Sistemas de estabilización: compuesto por unidades de medición inercial (IMU) que combinan acelerómetros y giroscopios para medir la aceleración y la velocidad angular en el sistema de tres ejes.
- Sistemas de posición y navegación: comprende unidades GPS, GNSS...

2.2.1.3. Carga de pago

La carga de pago, también conocida como *payload*, constituye uno de los elementos más flexibles dentro del segmento aire, ya que puede adaptarse según las necesidades específicas de cada misión. Su principal característica es que su función no está vinculada con la operación de la aeronave sino con la misión para la que ha sido diseñada. El diseño y el peso de la carga útil son factores críticos que deben ser considerados durante la configuración de la aeronave, ya que afectan directamente el rendimiento del sistema de propulsión y la autonomía del UAV. Son cargas de pago típicas en la industria:



Figura 2.7: Carga de pago Phase One P3.
Fuente: www.phaseone.com

- Cámaras de video o de visión infrarroja
- Sensores de humedad o agentes químicos
- Mercancías
- Sistemas de fumugación

- Equipo médico
- Iluminación

El peso de la carga de pago debe considerarse en su totalidad a la hora de dimensionar el grupo propulsor y debe tenerse en cuenta en el cálculo del MTOW.

2.2.2. Descripción del segmento tierra

El segmento tierra de un sistema UAV incluye todos los componentes y sistemas ubicados en tierra que son necesarios para controlar, monitorizar y gestionar las operaciones de vuelo de la aeronave no tripulada.

2.2.2.1. Estación de control en tierra

En primer lugar, la estación de control en tierra o GCS (*Ground Control Station*) es el componente central del segmento tierra. Esta estación actúa como el punto de comando principal desde donde se controla la aeronave. Generalmente, la GCS incluye hardware como ordenadores, monitores y dispositivos de entrada (joysticks, teclados o pantallas táctiles) que permiten al operador interactuar con el UAV. La GCS también alberga el software necesario para planificar rutas, supervisar parámetros de vuelo en tiempo real y gestionar la carga útil. Este software suele incluir herramientas para visualizar telemetría, mapas, y transmisiones de video en tiempo real provenientes del UAV.



Figura 2.8: Estación de control de tierra.
Fuente: www.motionew.com

La comunicación bidireccional entre el segmento tierra y el UAV es gestionada por enlaces de radiofrecuencia o satelitales. Los enlaces de datos proporcionan telemetría, información de estado y comandos de control a la aeronave. En configuraciones más avanzadas, también se emplean enlaces redundantes para garantizar la continuidad de la comunicación en caso de interferencias o fallos técnicos. En operaciones más allá de la línea de visión o BLOS (*Beyond Line of Sight*), los enlaces satelitales juegan un papel crucial para extender el rango de operación y permitir el control remoto a largas distancias.

2.2.2.2. Unidad de recepción y monitorización de señal de video

La unidad de recepción y monitorización de señal de video es un subsistema especializado dentro del segmento tierra. Su principal función es capturar, procesar y visualizar las transmisiones de video enviadas desde la aeronave en tiempo real. Destacan los receptores de radiofrecuencia que trabajan en bandas específicas (típicamente 5,8 GHz o 2,4 GHz), las antenas de alta ganancia para optimizar la recepción, y sistemas de decodificación que convierten las señales transmitidas en imágenes.

La unidad de recepción de video se diferencia de la GCS por su propósito y funcionalidad ya que está específicamente diseñada para gestionar las transmisiones visuales y no incluye capacidades de control directo sobre la aeronave, aunque en algunos casos puede estar integrada físicamente con la GCS. Además, mientras que la GCS interactúa bidireccionalmente con el UAV a través de enlaces de datos o *datalink*, la unidad de recepción de video opera principalmente como un sistema unidireccional.

2.2.2.3. Emisora de radio y control manual

Otro componente importante es el mando de radiocontrol. Este dispositivo es utilizado para el control manual de la aeronave, especialmente durante las fases críticas como el despegue y el aterrizaje. Los mandos de radiocontrol suelen operar en frecuencias específicas para minimizar las interferencias y garantizar una conexión estable (típicamente 2,4 GHz, 35 MHz o 40 MHz). En muchos casos, el mando de radiocontrol está integrado con la GCS, permitiendo al operador alternar entre el control manual y el autónomo de manera fluida.

La emisora de control incluye una serie de palancas y controles físicos que permiten al operador gestionar los diferentes aspectos del vuelo, como la velocidad, la altitud, la orientación y el movimiento lateral de la aeronave. Estas palancas están asociadas a canales específicos, que transmiten señales individuales para cada acción controlada. La cantidad de canales puede variar según la emisora, siendo las de 4 a 8 canales las más comunes en sistemas básicos, mientras que los modelos avanzados pueden ofrecer hasta 12 o más canales para operaciones complejas.

La interacción entre la emisora y el receptor de la aeronave se realiza a través de un protocolo de comunicación predeterminado que define cómo se codifican, transmiten y

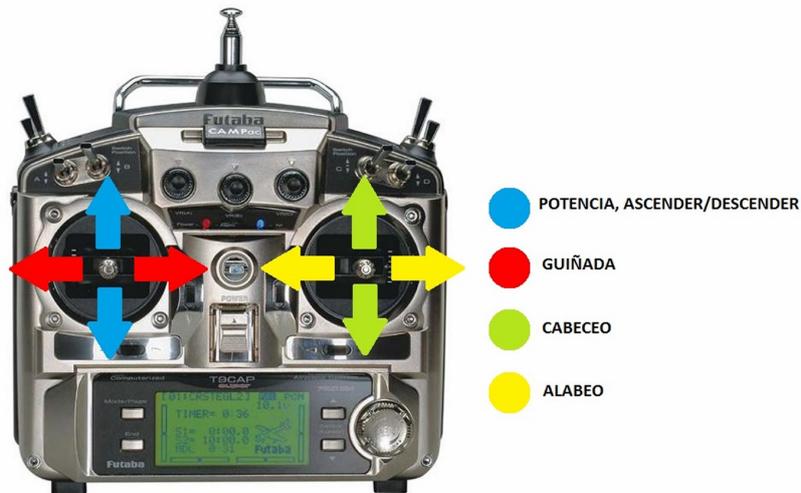


Figura 2.9: Controles típicos de un mando radiocontrol.
Fuente: Cursos Para Pilotos de RPAS: Enfoque Práctico, 2016

decodifican las señales. Algunos de los protocolos más comunes son SBUS y PWM.

Las emisoras modernas suelen incluir pantallas LCD o interfaces gráficas que proporcionan información en tiempo real al operador, como el estado de la batería, la fuerza de la señal y otros parámetros críticos del UAV. Algunas incluso integran funciones avanzadas, como la programación de mezclas de control, curvas de aceleración y ajustes personalizados.

Las palancas de la emisora tienen una configuración estándar en la industria de aeronaves radiocontrol, aunque pueden existir otras configuraciones. Como norma general, la palanca izquierda controla el empuje de los rotores y el movimiento de guiñada, mientras que la palanca derecha controla los movimientos de cabeceo y alabeo de la aeronave, tal y como se muestra en la figura 2.9.

2.3. Arquitectura de un UAV basado en CubePiot y PX4

En la siguiente sección, se llevará a cabo un análisis específico de los sistemas empleados para la integración del UAV desarrollado en este proyecto, examinando cada uno de los subsistemas que conforman el sistema completo y describiendo sus características técnicas y funcionales, así como su contribución al desempeño global de la aeronave. Este enfoque permitirá comprender las interrelaciones entre los distintos componentes y su papel en la operación autónoma del dron.

2.3.1. Firmware PX4

PX4 es un software de control de vuelo de código abierto diseñado para drones y otros vehículos no tripulados. Este proyecto ofrece un conjunto flexible de herramientas que permite a los desarrolladores de drones compartir tecnologías y crear soluciones personalizadas adaptadas a las aplicaciones específicas de estos vehículos.

PX4 forma parte de Dronecode, una organización sin ánimo de lucro administrada por Linux Foundation, cuyo propósito es promover el uso de software de código abierto en vehículos aéreos. Además de PX4, Dronecode también gestiona otros proyectos como QGroundControl, MAVLink y SDK, que juntos constituyen un ecosistema para el desarrollo y la operación de sistemas no tripulados.

El diagrama de la figura 2.10 ofrece una visión detallada de los bloques funcionales que conforman PX4. La parte superior del diagrama muestra los bloques correspondientes al *middleware*, mientras que la sección inferior presenta los componentes de la pila de vuelo (*flight stack*).

El código fuente está dividido en módulos o programas autónomos. Por lo general, cada bloque funcional corresponde exactamente a un módulo. Las flechas indican el flujo de información en las conexiones más importantes entre los módulos. Sin embargo, en la práctica, existen muchas más conexiones de las que se muestran, y algunos datos (como los parámetros) son accesibles para la mayoría de los módulos.

Los módulos se comunican entre sí a través de un bus de mensajes de publicación-suscripción llamado uORB. El uso de este esquema de publicación-suscripción implica lo siguiente:

- El sistema es reactivo, lo que significa que es asíncrono y se actualiza instantáneamente cuando hay nuevos datos disponibles.
- Todas las operaciones y comunicaciones están completamente paralelizadas.
- Cualquier componente del sistema puede consumir datos de cualquier parte de forma segura para los hilos de ejecución (*thread-safe*).

Como se observa en el diagrama de bloques, la arquitectura del firmware PX4 se puede dividir en dos capas principales:

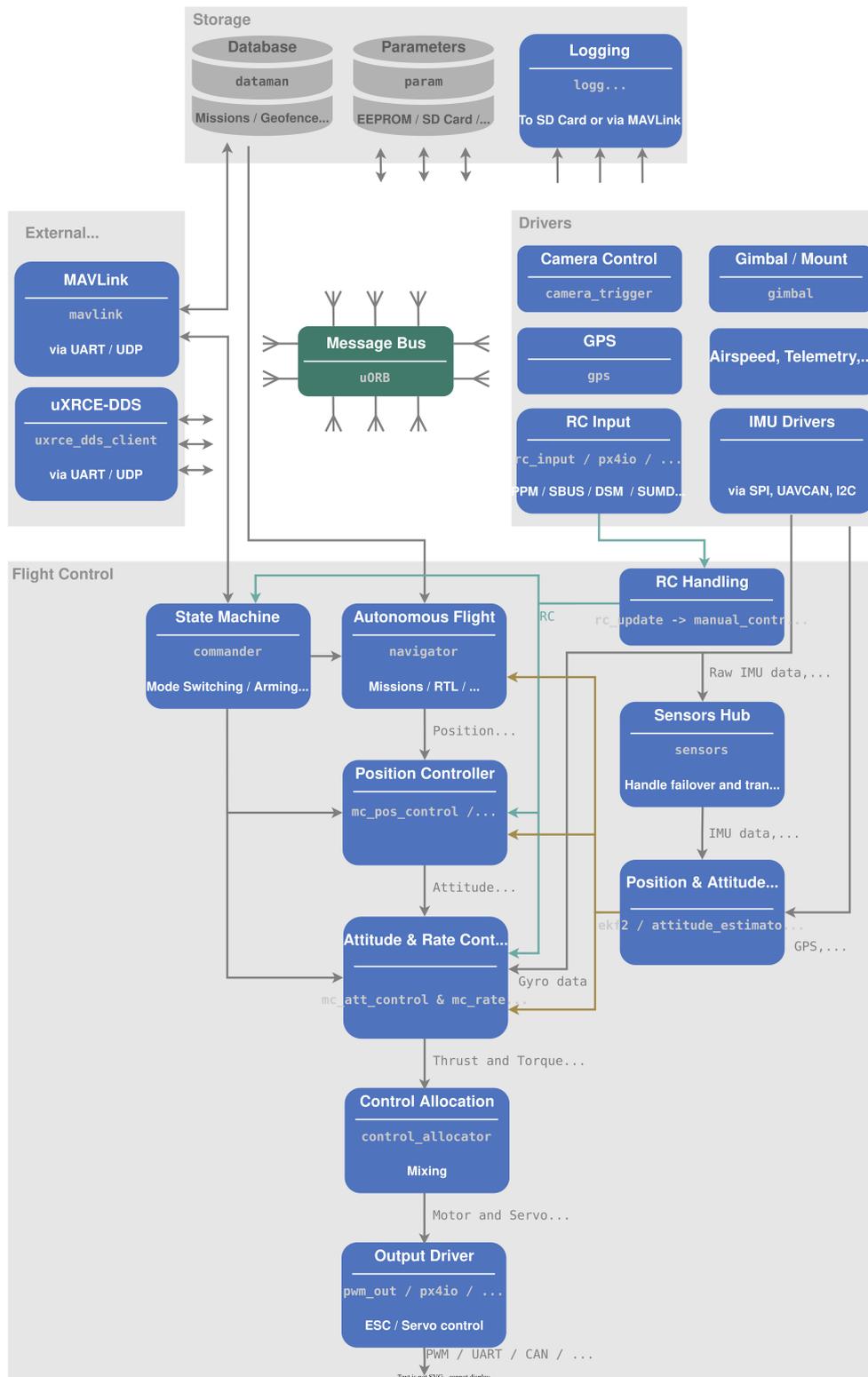


Figura 2.10: Diagrama de bloques de PX4.

Fuente: www.px4.io

1. Flight Stack: incluye algoritmos de guía, navegación y control diseñados para aeronaves autónomas. Los estimadores combinan entradas de sensores para calcular el estado del vehículo, como la actitud y posición. Los controladores comparan setpoints deseados con el estado actual estimado, generando correcciones para ajustar las variables del proceso y alcanzar los setpoints objetivos. Los mezcladores traducen comandos generales de fuerza, como "girar a la derecha", en órdenes específicas para los motores, considerando factores como la disposición de los motores y la inercia del vehículo.
2. Middleware: se compone principalmente de controladores de dispositivos para sensores integrados, comunicación con el mundo exterior (computadora auxiliar, estación de control en tierra, etc.) y el bus de mensajes de publicación-suscripción uORB. Además, incluye una capa de simulación que permite que el código de vuelo se ejecute en un sistema operativo de escritorio y controle un vehículo modelado por computadora en un espacio virtual.

En este sentido, PX4 es un software que se comporta como núcleo de operaciones para el control de vuelo de la aeronave y que está embebido en un hardware capaz de procesar y convertir dichas operaciones en variables físicas.

Además de PX4, otro firmware ampliamente utilizado en sistemas no tripulados es ArduPilot. Mientras que PX4 suele ser empleado junto con la estación de control terrestre QGroundControl, ArduPilot es frecuentemente utilizado con Mission Planner. En este proyecto se ha decidido utilizar el firmware PX4 por su compatibilidad con la estación de tierra utilizada, que se describirá en siguientes apartados.

2.3.2. Autopiloto Cube Orange

El Cube Orange es un módulo de piloto automático avanzado desarrollado dentro de la serie "The Cube" por CubePilot y utiliza una arquitectura basada en los bloques funcionales FMU (Flight Management Unit) e IO (Input/Output). Ambos bloques están integrados en un único módulo físico. La FMU es responsable de las tareas críticas de control de vuelo, mientras que el bloque IO gestiona las interfaces de entrada y salida, permitiendo la comunicación con periféricos y actuadores (ver imagen 2.11).

El Cube Orange integra un módulo principal diseñado para gestionar las tareas críticas de control y navegación. Este módulo cuenta con un microcontrolador principal ARM Cortex M7 de 32 bits que opera a 400 MHz. Además, incluye un procesador secundario dedicado a tareas complementarias, como la supervisión de seguridad y la gestión de redundancias.

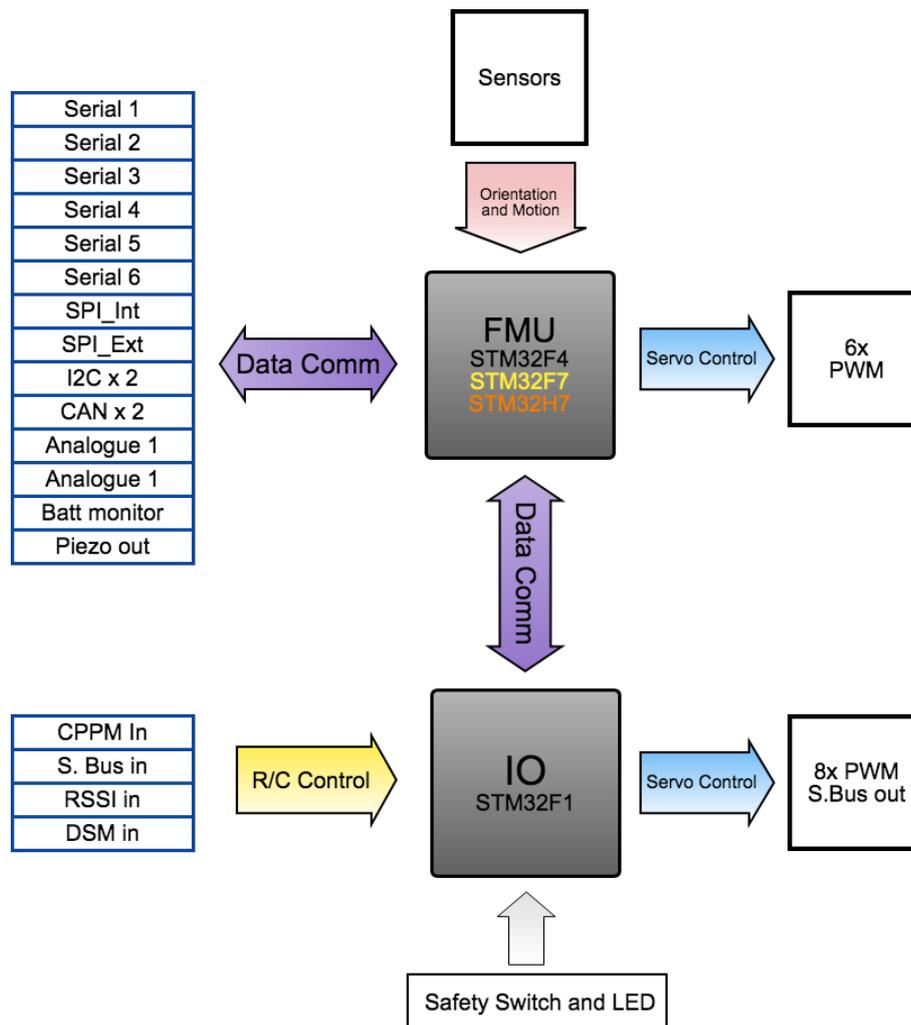


Figura 2.11: Diagrama de bloques del autopiloto Cube Orange.
Fuente: www.docs.cubepilot.org

2.3.2.1. Salidas PWM

El Cube Orange cuenta con 14 salidas PWM distribuidas entre los bloques FMU e IO, diseñadas para controlar servos y dispositivos similares.

1. IO PWM outputs: ocho de estas salidas están conectadas al bloque IO y pueden operar de manera independiente mediante control directo desde la entrada RC, incluso si la FMU no está activa, lo que las hace útiles en condiciones de failsafe o modo manual. Estas salidas soportan tasas de actualización de hasta 400 Hz.
2. FMU PWM outputs: las seis salidas PWM restantes están conectadas directamente al bloque FMU, lo que permite una menor latencia en la actualización de señales. A diferencia de las salidas del IO, estas no operan en condiciones de failsafe. Estas salidas también soportan tasas de actualización de hasta 400 Hz.

2.3.2.2. Puertos periféricos

Todos los periféricos del Cube Orange se conectan a través de un conector único de 80 pines, que se acopla a una *baseboard* (placa base) personalizada para cada aplicación. El módulo presenta distintos puertos seriales, puertos CAN, I2C y SPI (ver imagen 2.12).

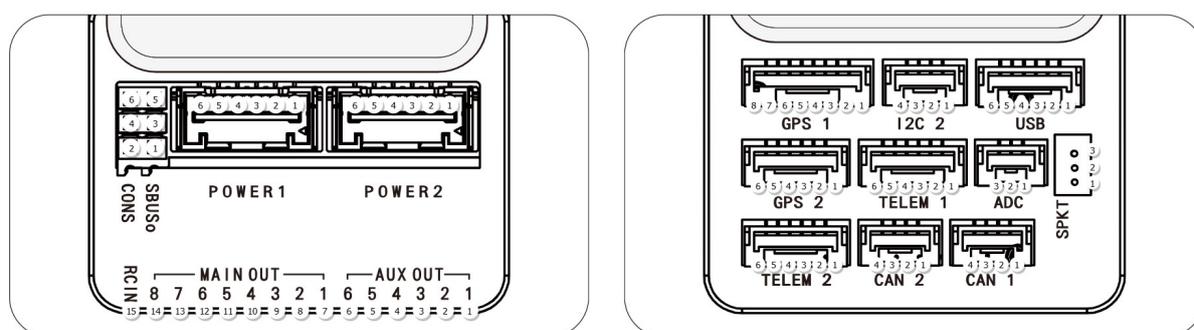


Figura 2.12: Puertos del autopiloto Cube Orange.

Fuente: www.docs.cubepilot.org

Serial 1 y 2 soportan control de flujo completo, mientras que Serial 3 se utiliza para GPS. Serial 4 permite una segunda conexión I2C, y Serial 5 es accesible desde la *baseboard* para receptores ADSB-IN.

Los dos puertos CAN soportan CAN 2.0, tienen terminación fija incorporada y permiten la conexión de periféricos que funcionan mediante este protocolo de comunicación, como la unidad GPS que se describirá en siguientes apartados.

El puerto I2C está conectado directamente a la FMU y es adecuado para cableados cortos. El SPI, sin amortiguación, permite conexiones rápidas y accesibles desde puntos de prueba en la baseboard.

2.3.2.3. Sensores integrados

El Cube Orange utiliza una configuración avanzada de sensores conectados a través del protocolo SPI, lo que asegura alta velocidad y baja latencia en la transmisión de datos.

1. Unidades de Medición Inercial (IMU): equipado con los sensores ICM20602 e ICM20948, proporciona redundancia y precisión en la medición de aceleraciones y giros. Las IMUs están montadas en una placa de amortiguación de vibraciones de segunda generación, mejorando la estabilidad y la calidad de los datos.
2. Barómetro: el módulo incluye un sensor barométrico MS5611 que sirve para determinar la altitud de la aeronave.

El Cube Orange es compatible con los principales firmware de código abierto, como ArduPilot y PX4, proporcionando una gran flexibilidad para adaptar su funcionalidad a los requisitos específicos de cada aplicación.

2.3.3. Sistema de radiocontrol y telemetría Herelink

Herelink es un sistema integrado que combina un controlador remoto, una estación terrestre y un sistema de transmisión digital inalámbrica, diseñado para su uso con CubePilot, ya sea a través del firmware ArduPilot o PX4. Este sistema permite la transmisión de control remoto (RC), video en alta definición (HD) y datos de telemetría hasta una distancia de 20 km entre la estación terrestre y la unidad de aire.

El producto Herelink se divide en dos componentes principales: una unidad de aire y un controlador remoto.

2.3.3.1. Unidad de aire

La unidad de aire es el módulo que va embarcando en la aeronave y tiene la misión de recibir señales de control remoto, transmitir telemetría y enviar video en alta definición desde el vehículo al controlador remoto.

La unidad de aire está equipada con un procesador integrado de 8 núcleos (SoC), diseñado para gestionar el procesamiento de datos en tiempo real. El módulo admite la transmisión de video mediante dos puertos HDMI, compatibles con resoluciones de hasta 1080p a 60 fps, ofreciendo imágenes de alta calidad con baja latencia. Además, proporciona un alcance operativo de hasta 20 km en condiciones ideales.

En cuanto a conectividad, incluye puertos periféricos como dos entradas HDMI para cámaras externas, un puerto UART para telemetría, un puerto de alimentación, una conexión USB-C para configuración, un puerto S.bus y dos conectores de antena.

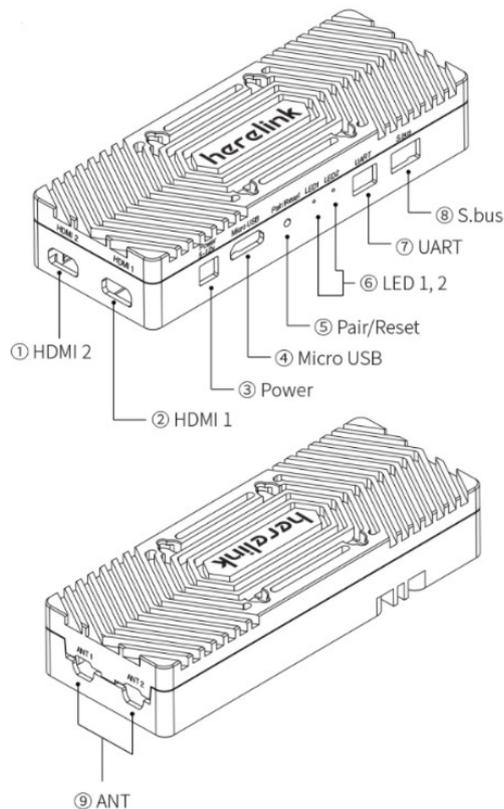


Figura 2.13: Unidad de aire del Herelink.
Fuente: www.docs.cubepilot.org

2.3.3.2. Controlador remoto

El controlador remoto es al mismo tiempo una estación de control terrestre portátil, una emisora de radio con mandos de control y un sistema de monitorización de señal y video.

La unidad terrestre funciona sobre un sistema operativo Android e integra de serie la estación de control en tierra QGroundControl que se detallará en el siguiente apartado. El dispositivo cuenta con una pantalla de alta resolución, dos *joysticks* para el control de la aeronave y diversos botones programables por el usuario.

Además, al estar construido sobre los principios de un teléfono móvil, presenta conectividad Wi-Fi y Bluetooth. El alcance del dispositivo es de 20 km gracias a las dos antenas orientables que lleva instaladas (ver imagen 2.14).



Figura 2.14: Controlador remoto del Herelink.

Fuente: www.docs.cubepilot.org

2.3.4. Estación de control en tierra QGroundControl

QGroundControl es una estación de control terrestre de código abierto diseñada para la configuración y operación de vehículos no tripulados y opera bajo el protocolo de comunicaciones MAVLink. Su objetivo principal es proporcionar una interfaz intuitiva y accesible tanto para usuarios novatos como para profesionales.

Si bien es cierto que es compatible con los autopilotos ArduPilot y PX4, es este último el que suele estar asociado al programa QGroundControl, mientras que el primero está optimizado para su uso en Mission Planner. Cabe mencionar que la interfaz de QGroundControl es más moderna y simple que la de Mission Planner.

Entre sus funcionalidades destacadas, QGroundControl permite al usuario realizar las siguientes operaciones:

- Configurar UAVs basados en PX4 o Ardupilot
- Planificar y ejecutar misiones autónomas
- Visualizar en tiempo real la posición del vehículo sobre un mapa
- Visualizar la trayectoria de vuelo de la aeronave, así como datos de instrumentos
- Visualizar vídeo en tiempo real y en primera persona (FPV) con superposiciones de instrumentos

La estación de tierra QGroundControl es compatible con diversas plataformas como Windows, OS X, Linux, iOS y Android. La interfaz de usuario está diseñada para ser intuitiva, ofreciendo un mapa interactivo que muestra información del vehículo y permite la planificación de misiones de vuelo.

La estación de tierra es la herramienta básica para la configuración de gran parte de la aeronave, por lo que su interfaz y funcionalidades se mostrarán con más detalle en el capítulo de integración de sistemas.

2.3.5. GPS Here3+

Here3+ es un módulo GNSS de alta precisión que admite el modo RTK, proporcionando una precisión de posicionamiento de centímetros en entornos ideales. Está basado en el chipset u-blox M8P.



Figura 2.15: Unidad de aire y RTK Here3+

Fuente: www.rc-innovations.es

Una de las mejoras significativas del Here3+ respecto a versiones anteriores es la incorporación de la brújula RM3100, lo que mejora su precisión en entornos con altos niveles de ruido. Por otra parte, está equipado con una IMU completa para aplicaciones de navegación avanzada. En la estación de control en tierra existe la posibilidad de configurar la brújula del GPS Here3+ como fuente de datos principal.

Otra de las diferencias significativas de este modelo con respecto a modelos anteriores es que el Here3+ funciona mediante el protocolo DroneCAN. Este protocolo permite la

integración de varios dispositivos en un mismo bus de datos. Sin embargo, requiere algunos pasos de configuración adicionales.

El producto incluye un sistema de aumentación RTK con su respectiva antena para mejorar la precisión de posicionamiento. El RTK permanece conectado a la estación de control en tierra mientras que el módulo GPS principal se encuentra embarcado en la aeronave.

2.3.6. Sistemas de energía y distribución eléctrica

Los sistemas de energía son todos los sistemas encargados de generar y distribuir la potencia eléctrica necesaria a los distintos componentes de la aeronave.

2.3.6.1. Baterías

En el ámbito de los drones, las baterías más comúnmente utilizadas son las de polímero de litio (Li-Po), debido a su alta densidad energética, peso reducido y capacidad de descarga rápida. Estas baterías están disponibles en diversas configuraciones, determinadas por el número de celdas y su capacidad total.

En este proyecto, se han utilizado dos baterías Li-Po de 4 celdas (4S), cada una con una tensión nominal de 14,8 V y una capacidad de 6.000 mAh. Esta configuración proporciona una fuente de alimentación de 14,8 V y 12.000 mAh en total, suficiente para satisfacer los requerimientos de potencia del hexacóptero.



Figura 2.16: Batería de 4 celdas utilizada.

Fuente: www.amazon.es

2.3.6.2. DC/DC

Además de las baterías, se utiliza un convertidor DC/DC que transforma los 14,8 V suministrados por las baterías Li-Po a 5,3 V. Este ajuste es necesario porque algunos componentes del sistema operan a voltajes diferentes, lo que garantiza su correcto funcionamiento y protege los circuitos de posibles daños por incompatibilidad de tensiones.

2.3.6.3. Unidad de distribución de potencia

La placa de distribución de potencia tiene la función de distribuir las señales PWM generadas por el Cube Orange a los controladores electrónicos de velocidad (ESC), así como la alimentación proveniente de las baterías a los ESC y, en consecuencia, a los motores. Este sistema asegura una conexión organizada, permitiendo el funcionamiento sincronizado de todos los motores del hexacóptero.

2.3.7. Sistemas de propulsión

Los sistemas propulsores son responsables de generar la fuerza necesaria para el despegue, maniobra y vuelo estacionario. Están compuestos por motores, hélices y controladores electrónicos de velocidad (ESC).

2.3.7.1. Controladores electrónicos de velocidad

Los controladores electrónicos de velocidad (ESC) son los encargados de regular la velocidad de los motores eléctricos en función de las señales recibidas desde el controlador de vuelo. Además, los ESC gestionan la dirección de giro y, en algunos casos, proporcionan funciones adicionales como el frenado o la protección contra sobrecargas. Estos dispositivos convierten la señal PWM enviada por el controlador de vuelo en pulsos eléctricos que controlan el funcionamiento del motor. Existen diferentes tipos de ESC diseñados para satisfacer diversas necesidades:

- ESC analógicos: funcionan con señales PWM tradicionales, siendo opciones simples y económicas, adecuadas para aplicaciones donde no se requieren cambios rápidos en la velocidad de los motores.
- ESC digitales: utilizan protocolos avanzados como DSHOT o MULTISHOT, ofreciendo comunicación rápida y precisa, ideales para drones de alto rendimiento, como los utilizados en carreras o aplicaciones industriales.
- ESC con BEC (*Battery Eliminator Circuit*): incluyen un circuito que reduce el voltaje de la batería principal para alimentar otros componentes, eliminando la necesidad de fuentes de alimentación adicionales.
- ESC opto: no incluyen BEC, lo que los hace más ligeros y eficientes, siendo ideales para configuraciones de drones multirrotores con alimentación separada para los sistemas electrónicos.

En este proyecto se han utilizado seis ESC opto de la marca Hobbywing, en concreto los “Hobbywing Platinum Pro 30A”.



Figura 2.17: ESC utilizado en el proyecto.
Fuente: elaboración propia.

2.3.7.2. Motores

Los motores utilizados en UAV se dividen principalmente en motores con escobillas y motores sin escobillas (*brushless*). Los motores con escobillas son económicos pero menos eficientes y requieren más mantenimiento. En contraste, los motores sin escobillas, particularmente del tipo *outrunner*, son ampliamente preferidos en UAV multirrotores debido a su alta eficiencia, mayor torque y bajo mantenimiento.

Los motores utilizados en el proyecto son los “T-Motor MT4006-13”. Este motor de tipo *brushless outrunner* tiene una velocidad nominal de 400 KV, un peso de 81 g y una corriente máxima de 18 A. Su construcción es robusta y es compatible con baterías LiPo de 3 a 6 celdas.

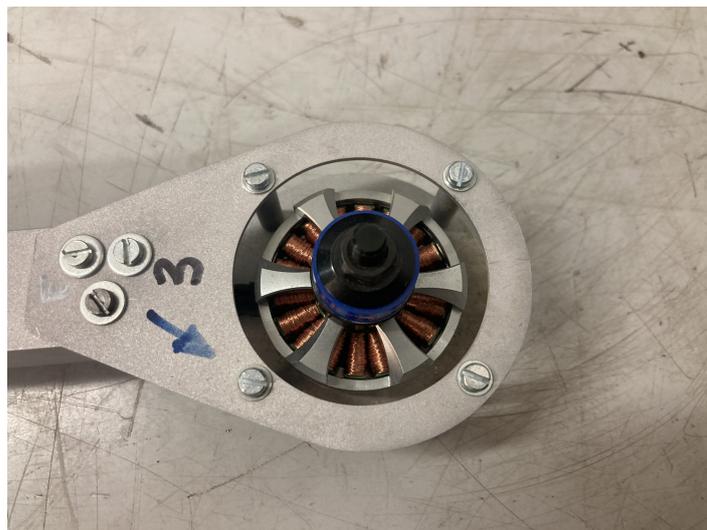


Figura 2.18: Motor utilizado en el proyecto.
Fuente: elaboración propia.

2.3.7.3. Hélices

Las hélices utilizadas en este proyecto son las T-Motor CF Prop 13x4.4L. Fabricadas en fibra de carbono, tienen un diámetro de 13 pulgadas y un paso de 4.4 pulgadas. El conjunto incluye tres hélices con orientación en sentido horario y tres con orientación antihoraria, adaptándose así a la disposición de los motores.



Figura 2.19: Hélices utilizadas en el proyecto.
Fuente: elaboración propia.

Capítulo 3

Integración y configuración de sistemas

Este capítulo aborda la configuración de la aeronave y la integración de los sistemas periféricos al controlador de vuelo, actuando como manual de instrucciones para establecer el correcto funcionamiento del sistema. La configuración se realiza principalmente a través de la estación de control en tierra QGroundControl, herramienta que permite interactuar con el autopiloto y ajustar los parámetros necesarios para adaptar la aeronave a los requisitos específicos de la misión.

El proceso comienza conectando el autopiloto Cube Orange a un ordenador mediante un cable micro USB a USB-A. Es imprescindible que el Cube Orange disponga de una tarjeta SD instalada, ya que esta tarjeta actúa como medio de almacenamiento para el firmware del controlador de vuelo (FMU) y para los registros de vuelo generados durante la operación de la aeronave.

Cada elemento integrado al controlador de vuelo tiene asociados un conjunto de parámetros configurables, accesibles a través del GCS QGroundControl. Estos parámetros permiten al usuario ajustar el comportamiento del sistema de acuerdo con las necesidades operativas, desde la calibración de sensores hasta los valores límite de las maniobras del vehículo. A lo largo del capítulo se detallará cómo estos parámetros son configurados, así como su impacto en la operación de la aeronave.

Antes de iniciar la configuración, es importante comprender la disposición física (*layout*) del sistema completo. Este *layout* incluye la ubicación e integración de todos los periféricos conectados al controlador de vuelo, la conexión de este a los sistemas eléctricos y de propulsión, y su instalación mecánica en la estructura de la aeronave.

3.1. *Layout* de componentes e integración en la aeronave

Cubepilot ofrece un ecosistema integral de hardware y software diseñado para facilitar la integración de sistemas. Algunos de los componentes descritos en el capítulo anterior como el Cube Orange, el GPS Here3+, el Herelink o la estación de tierra QGroundControl forman parte de dicho ecosistema, por lo que su integración física no resulta excesivamente compleja. En la imagen 3.1 se ofrece un esquema generalizado del ecosistema CubePilot que incluye todos los periféricos que se podrían llegar a integrar.

El controlador de vuelo Cube Orange utiliza conectores hembra JST GH en sus puertos de conexión de periféricos, conectores Molex hembra en sus puertos de conexión de potencia y un raíl de conexión Dupont 2,54 mm para sus salidas de PWM.

En el otro lado, los periféricos del ecosistema CubePilot ya incorporan los conectores asociados para su conexión al controlador de vuelo. Sin embargo, se ha comprado un kit de conectores de distinto tamaño para fabricar cualquier cable adicional que resultara necesario.

El *layout* del sistema se puede dividir en tres bloques funcionales:

- Bloque de controlador de vuelo y periféricos: se compone del controlador de vuelo Cube Orange, el GPS Here3+, la unidad de aire del Herelink y el zumbador.
- Bloque de potencia: se compone de las baterías, el convertidor de voltaje DC/DC y la unidad de distribución de potencia.
- Bloque de propulsión: se compone de los controladores electrónicos de velocidad, los motores y las hélices.

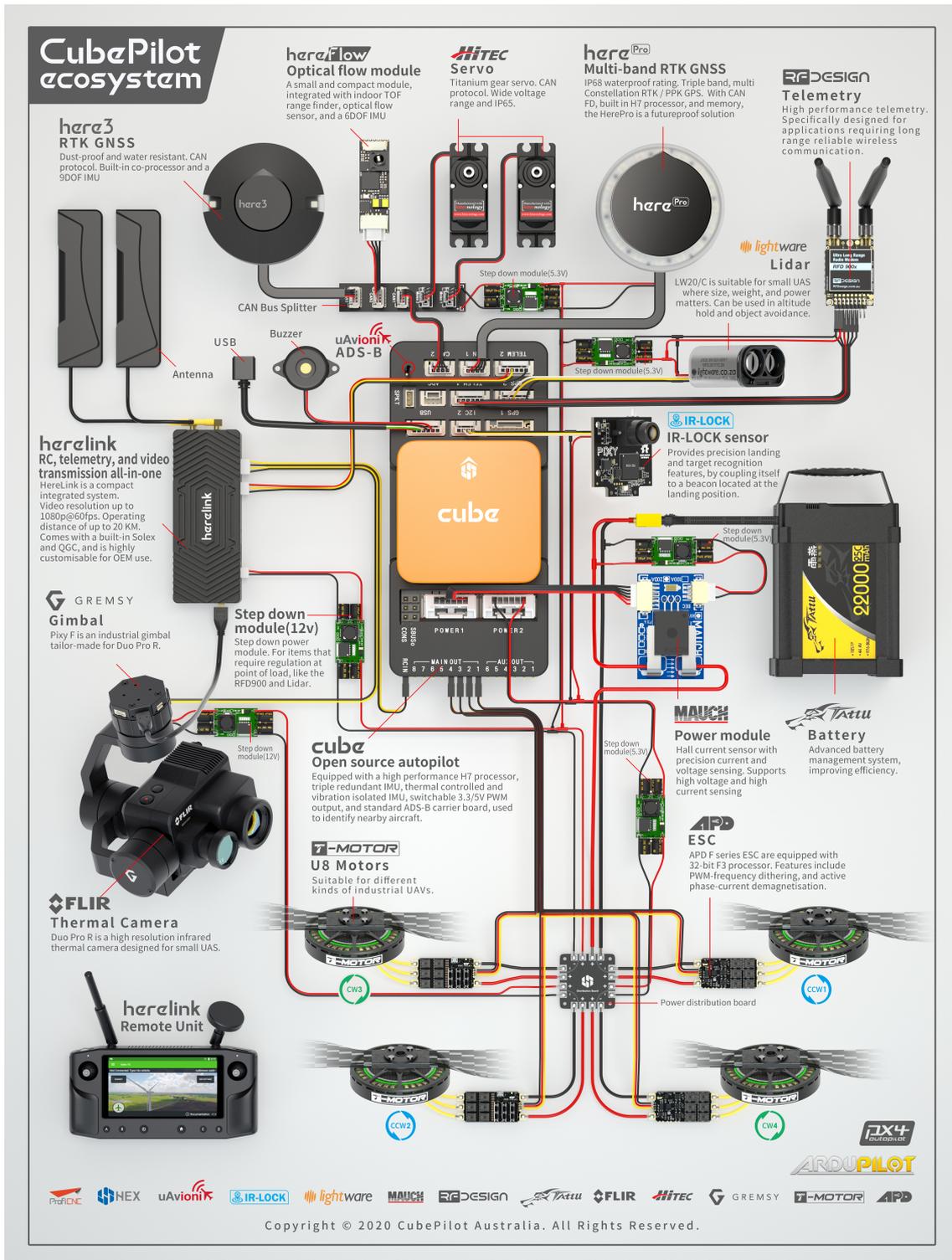


Figura 3.1: Esquema de conexiones del ecosistema CubePilot.

Fuente: www.docs.cubepilot.org

3.1.1. Bloque de controlador de vuelo

Los sistemas pertenecientes al bloque del controlador de vuelo se han instalado sobre una plataforma metálica montada en la parte superior de la estructura de la aeronave.

3.1.1.1. Instalación del Cube Orange

El Cube Orange se ha instalado con cinta adhesiva de doble cara en el centro geométrico del hexacóptero para asegurar una distribución equilibrada de masas y un funcionamiento óptimo de los sensores inerciales. Además, es conveniente que esté alineado con la dirección de avance de la aeronave para facilitar el proceso de configuración de calibración de los sensores.

3.1.1.2. Instalación del GPS Here3+

La unidad GPS Here3+ se ha montado sobre un soporte que lo eleva ligeramente respecto del resto de componentes para mejorar la conectividad satelital. Dicho soporte se ha instalado en la plataforma metálica mediante uniones atornilladas.

El cable de conexión del Here3+ presenta dos conectores idénticos de 4 pines. Esto es característico de los dispositivos CAN ya que permite conectar otros dispositivos al mismo bus de comunicaciones. En este caso, al ser el único dispositivo CAN del sistema, sólo es necesario conectar uno de los conectores a cualquiera de los puertos CAN (CAN 1.º o CAN 2.º) del Cube Orange.

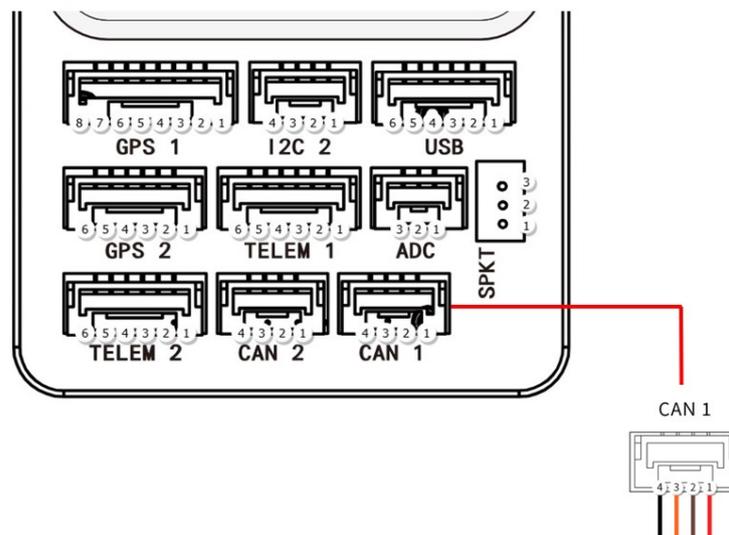


Figura 3.2: Conexión del GPS Here3+.

Fuente: elaboración propia

3.1.1.3. Instalación de la unidad de aire Herelink

La unidad de aire del Herelink se ha instalado con cinta adhesiva de doble cara sobre la plataforma metálica a la izquierda del controlador de vuelo.

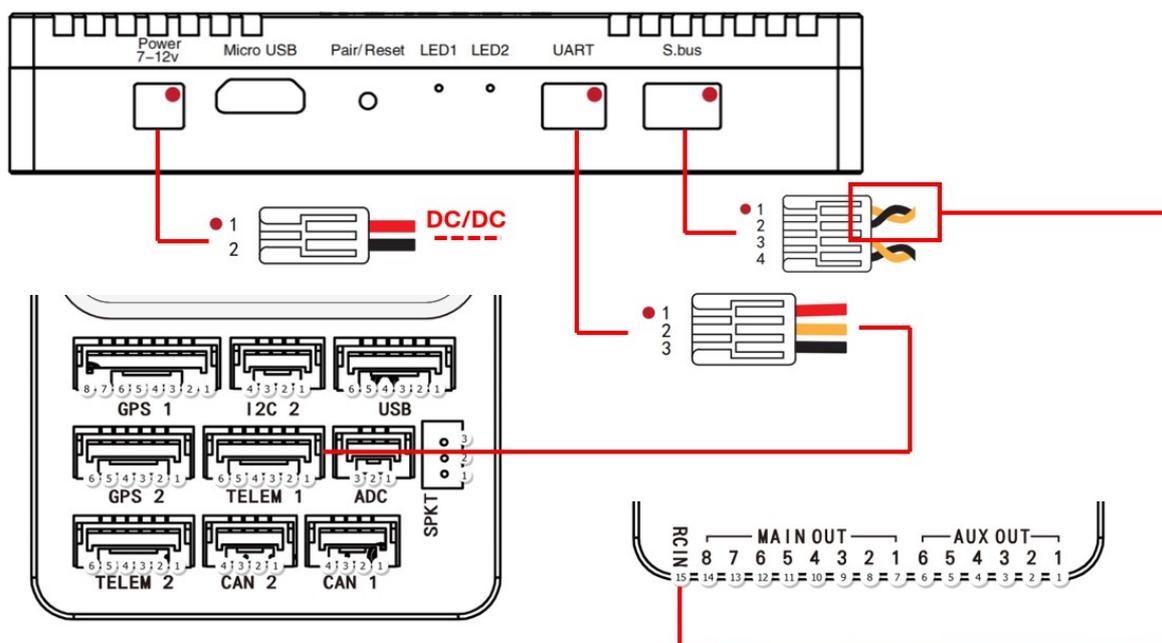


Figura 3.3: Conexión de la unidad de aire Herelink.

Fuente: elaboración propia

El puerto S.bus del Herelink se debe conectar a la entrada de radio RC IN” del controlador de vuelo. Hay que tener en cuenta que del cable correspondiente salen dos pares trenzados (ver imagen 3.3). Los pines 1 y 2 transportan la señal de control de la aeronave, mientras que los pines 3 y 4 transportan, en caso de estar instalado, la señal de control del gimbal. En este caso, se ha conectado únicamente el cable de control de la aeronave (recuadro rojo).

La unidad de aire del Herelink se alimenta entre 5 y 12 voltios, por lo que el puerto de alimentación no puede ser conectado directamente a las baterías. En su defecto, el puerto de alimentación se conecta al convertidor de voltaje DC/DC, cuyo conexionado se detalla más adelante.

El puerto UART se conecta al la entrada ”TELEM 1” del controlador de vuelo. Esta conexión transporta información de telemetría de los dispositivos que se deseen conectar a los puertos ”HDMI” del Herelink.

Finalmente, se conectan las antenas de recepción y emisión de radio y telemetría, respectivamente. Dichas antenas se han instalado en el lado inferior del tren de aterrizaje del hexacóptero.

3.1.1.4. Instalación del zumbador

El zumbador se conecta directamente a la entrada "USB" del controlador de vuelo. Este periférico no es imprescindible para la operación de la aeronave, pero proporciona información auditiva acerca del estado del Cube Orange.

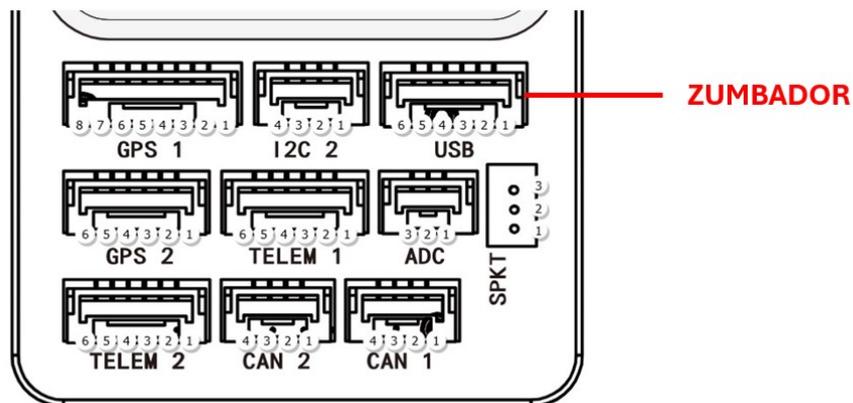


Figura 3.4: Conexión del zumbador.
Fuente: elaboración propia

Este dispositivo se ha montado sobre la plataforma metálica con cinta adhesiva de doble cara. En la figuras 3.5 y 3.6 se muestra dicha plataforma con todos los sistemas del bloque del controlador de vuelo instalados sobre ella.

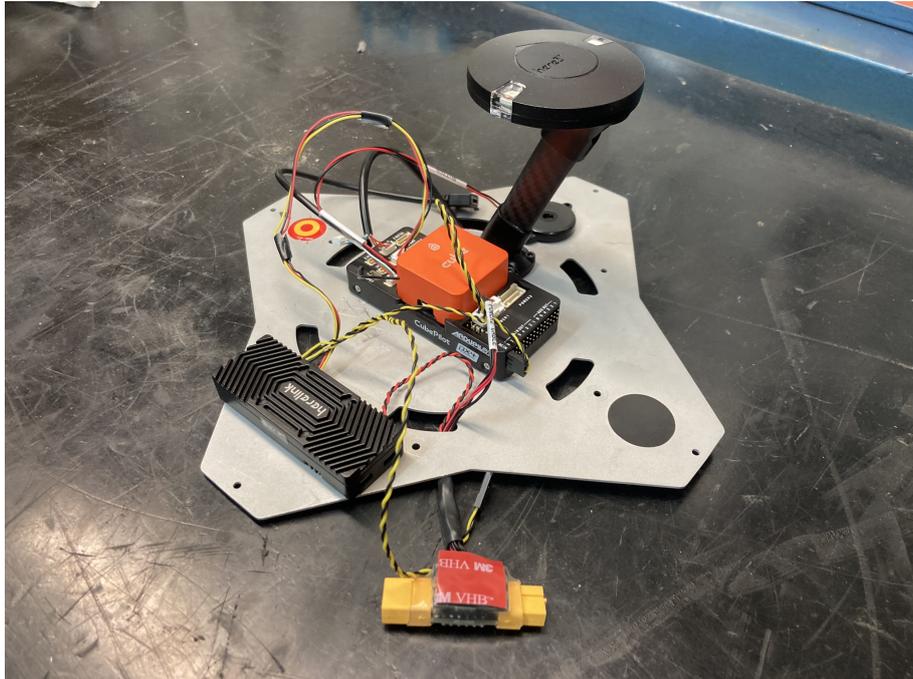


Figura 3.5: Foto de la plataforma metálica con los sistemas del controlador de vuelo.
Fuente: elaboración propia

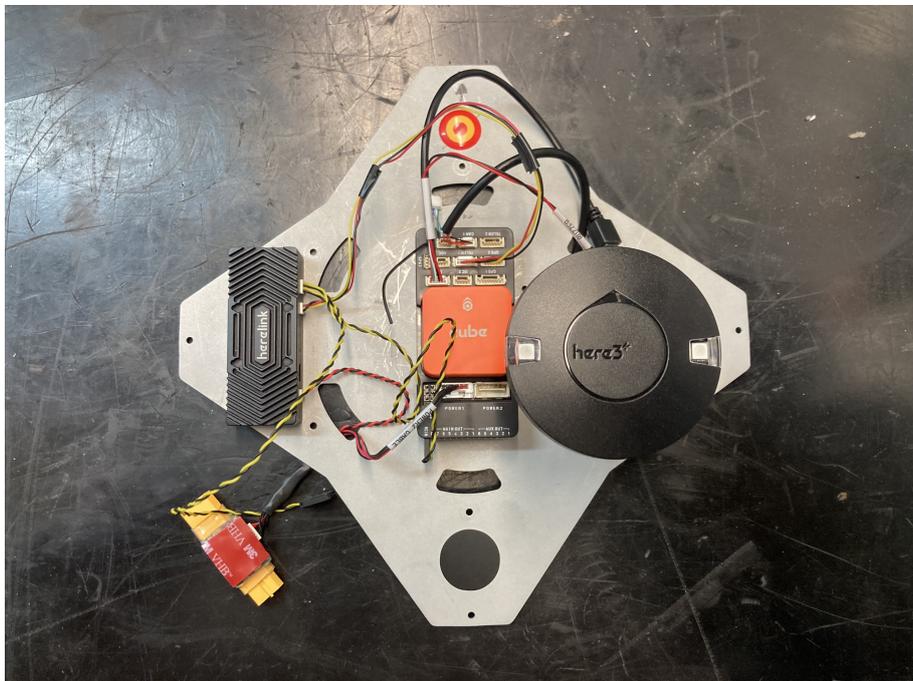


Figura 3.6: Foto de la plataforma metálica con los sistemas del bloque controlador de vuelo.
Fuente: elaboración propia

3.1.2. Bloque de potencia

El bloque de potencia es el encargado de alimentar a todos los dispositivos eléctricos de la aeronave. No todos los dispositivos se alimentan al mismo voltaje, por lo que se deben utilizar uno o varios convertidores de voltaje DC/DC para adaptar la tensión de las baterías a la tensión requerida por el resto de sistemas.

En este caso, existen dos líneas de voltaje independientes: una línea de 14,8 V que proviene directamente de las baterías y que alimenta a los controladores electrónicos de velocidad y a la entrada del DC/DC, y una línea de baja tensión de 5,3 V que proviene de la salida del DC/DC y que alimenta al Cube Orange y a la unidad de aire del Herelink.

En la figura 3.7, las dos baterías están conectadas en paralelo a un convertidor de voltaje DC/DC y a una unidad de distribución de potencia, independientemente (línea de 14,8 V).

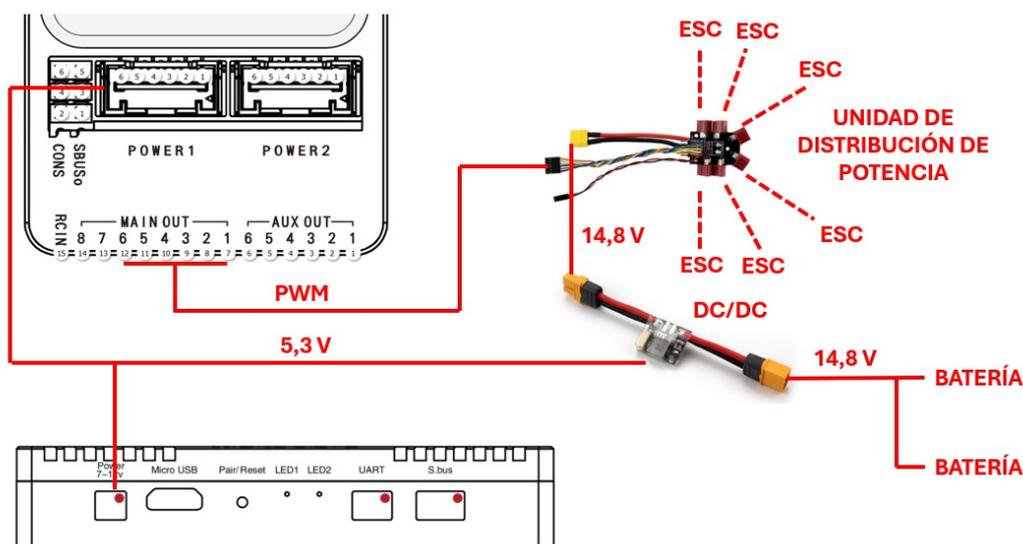


Figura 3.7: Conexión eléctrica del bloque de potencia.

Fuente: elaboración propia

La unidad de distribución de potencia se encarga de distribuir el voltaje de las baterías a los seis controladores electrónicos de velocidad. Por otro lado, la unidad de distribución de potencia se conecta mediante otro cable de seis hilos a los puertos "MAIN OUT 1-6" del controlador de vuelo. Por este cable viaja la señal PWM, encargada de controlar la velocidad de rotación de las hélices.

La salida del DC/DC (línea de 5,3 V) está conectada en paralelo al Cube Orange y al Herelink. Para ello, se han tenido que soldar los cables de cada dispositivo entre ellos. El

cable de alimentación del Cube Orange se conecta al puerto "POWER 1", mientras que el cable del Herelink debe conectarse al puerto de alimentación.

3.1.3. Bloque de propulsión

El *layout* del bloque propulsor se extiende desde la estructura central de la aeronave hasta los extremos de los brazos, donde se encuentran los motores y los rotores.

En este caso, el conexionado eléctrico del bloque propulsor es relativamente sencillo. La unidad de distribución de potencia distribuye la alimentación proveniente de las baterías y la señal de PWM proveniente del controlador de vuelo a cada uno de los controladores electrónicos de velocidad. A su vez, las salidas de los ESC se conectan a los motores a través de tres cables independientes (VDC, GND y PWM). En este punto, la potencia eléctrica se transforma en potencia mecánica útil para generar empuje.

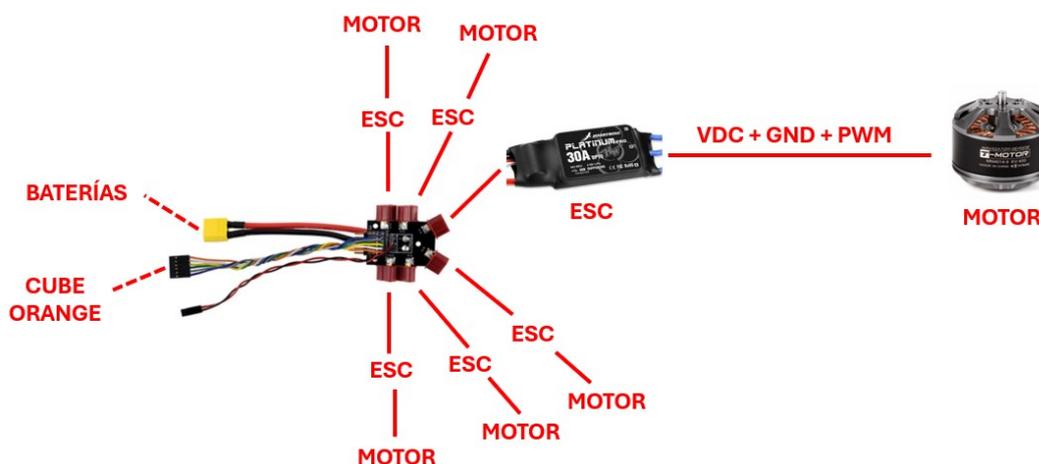


Figura 3.8: Conexión eléctrica del bloque de propulsión.

Fuente: elaboración propia

En las figuras 3.9 y 3.10 se muestra en detalle el conexionado eléctrico del grupo propulsor del hexacóptero.

Finalmente, se ensamblan todos los componentes a la estructura de la aeronave. Para ello, se ha anclado la plataforma portante del grupo propulsor a la base del hexacóptero mediante uniones atornilladas, y sobre ella se ha montado la plataforma portante de los sistemas de control de vuelo. El bloque de potencia es poco voluminoso (salvo las baterías) y se embrida correctamente entre las dos plataformas.

Sirvan las figuras 3.11, 3.12 para comprender la arquitectura del hexacóptero y de la secuencia de montaje empleada.

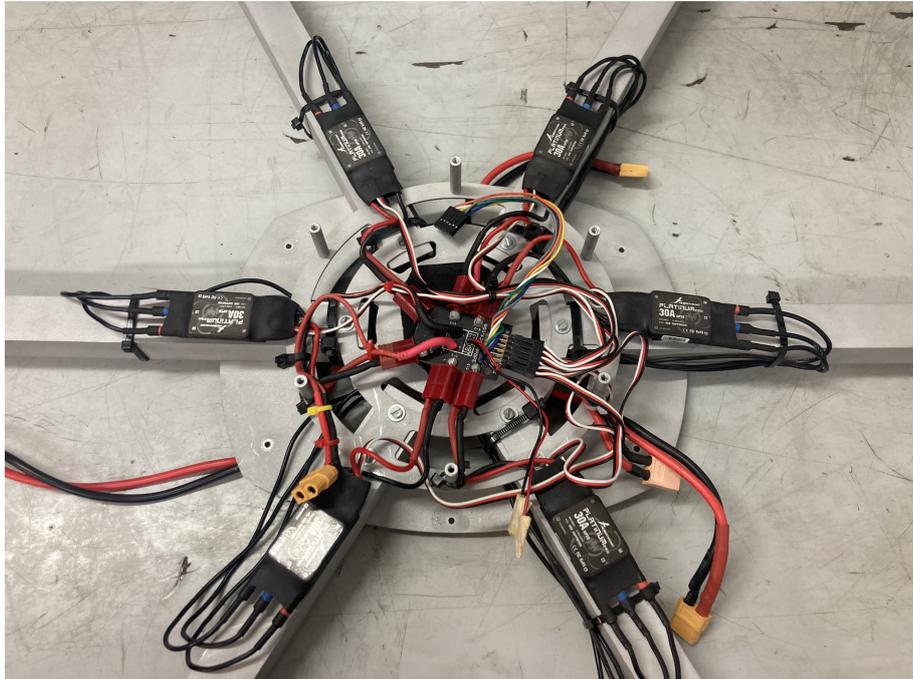


Figura 3.9: Foto del conexionado eléctrico del grupo propulsor.
Fuente: elaboración propia

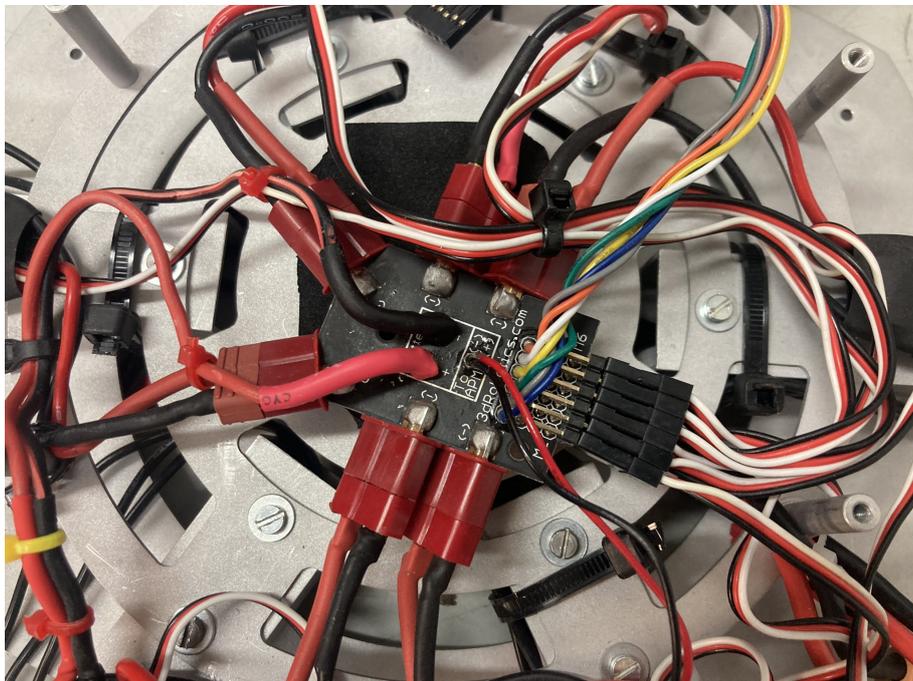


Figura 3.10: Foto del conexionado eléctrico del grupo propulsor.
Fuente: elaboración propia



Figura 3.11: Foto de la base del hexacóptero.
Fuente: elaboración propia

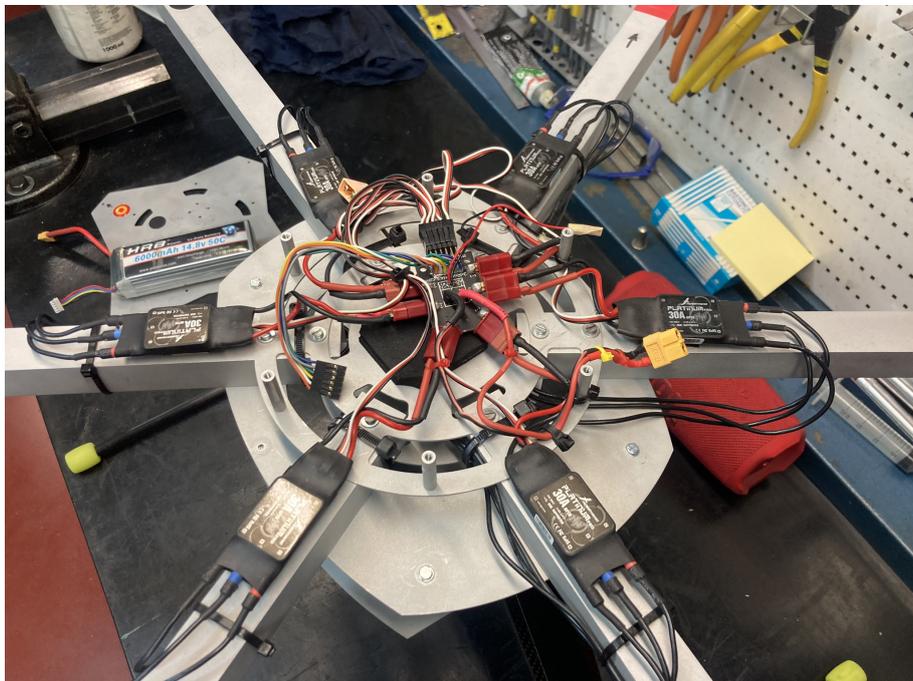


Figura 3.12: Foto del montaje de la plataforma propulsora.
Fuente: elaboración propia



Figura 3.13: Foto del hexacóptero ensamblado.
Fuente: elaboración propia

3.2. Configuración de sistemas en QGroundControl

Una vez realizada la integración mecánica y eléctrica de todos los componentes se comienzan a configurar los diferentes sistemas a través del software QGroundControl. Cada sistema tiene asociados unos parámetros configurables por el usuario según la aplicación.

En este apartado se va a explicar todo el procedimiento seguido en la configuración de componentes, principalmente mediante capturas de pantalla del software QGroundControl.

3.2.1. Actualización del firmware

El primer paso en la configuración del Cube Orange consiste en cargar el firmware PX4 en el controlador de vuelo, o, si ya está instalado, verificar si hay actualizaciones disponibles. Este proceso se realiza exclusivamente a través de la estación de control en tierra (GCS), siguiendo los siguientes pasos:

1. Desconectar el controlador de vuelo del ordenador
2. Conectar el ordenador a una red WiFi para garantizar acceso a las últimas versiones del firmware.

3. Abrir la pestaña de "Firmware.^{en} el GCS.
4. Conectar el Cube Orange al ordenador mediante un cable USB, tras lo cual se abrirá automáticamente una ventana para seleccionar el tipo de firmware a instalar.
5. Seleccionar PX4 como firmware deseado.

Una vez completado este proceso, el Cube Orange estará preparado para continuar con el resto de configuraciones necesarias para la integración del sistema. Conviene reiniciar el controlador de vuelo y recargar la pestaña de configuración de la aeronave para visualizar todas las pestañas de configuración.

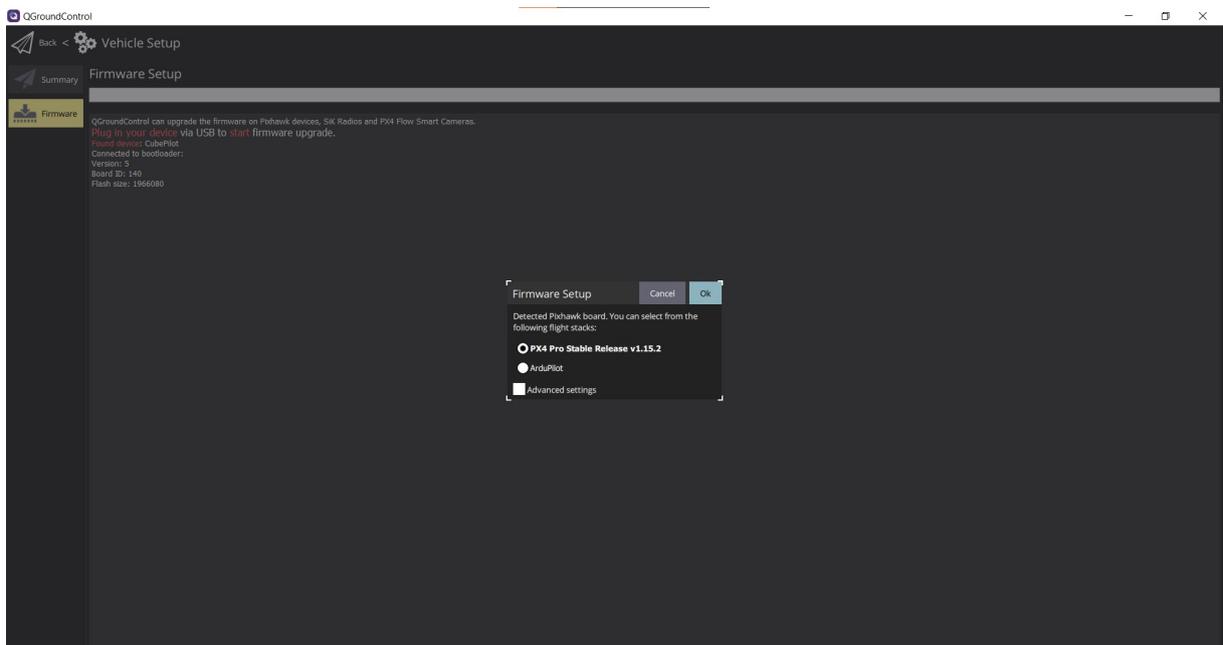


Figura 3.14: Actualización del firmware en QGroundControl
Fuente: elaboración propia

3.2.2. Selección del *airframe*

El siguiente paso en la configuración de la aeronave es la selección del tipo de *airframe* a utilizar. El QGroundControl dispone de una base de datos que incluye los tipos de *airframes* más comunes, y según la opción seleccionada, se cargarán una serie de parámetros específicos de cada vehículo.

En este proyecto se ha utilizado un hexacóptero cuya configuración incluye dos brazos paralelos al eje de cabeceo. Por lo tanto, es necesario seleccionar esta configuración específica en la lista de *airframes* disponible. Una vez elegido el *airframe* adecuado, se debe reiniciar el controlador de vuelo para que los parámetros correspondientes se apliquen

correctamente y se pueda continuar con el proceso de configuración. Para ello, basta con pulsar el botón *Apply and Restart* recuadrado en rojo en la figura 3.15

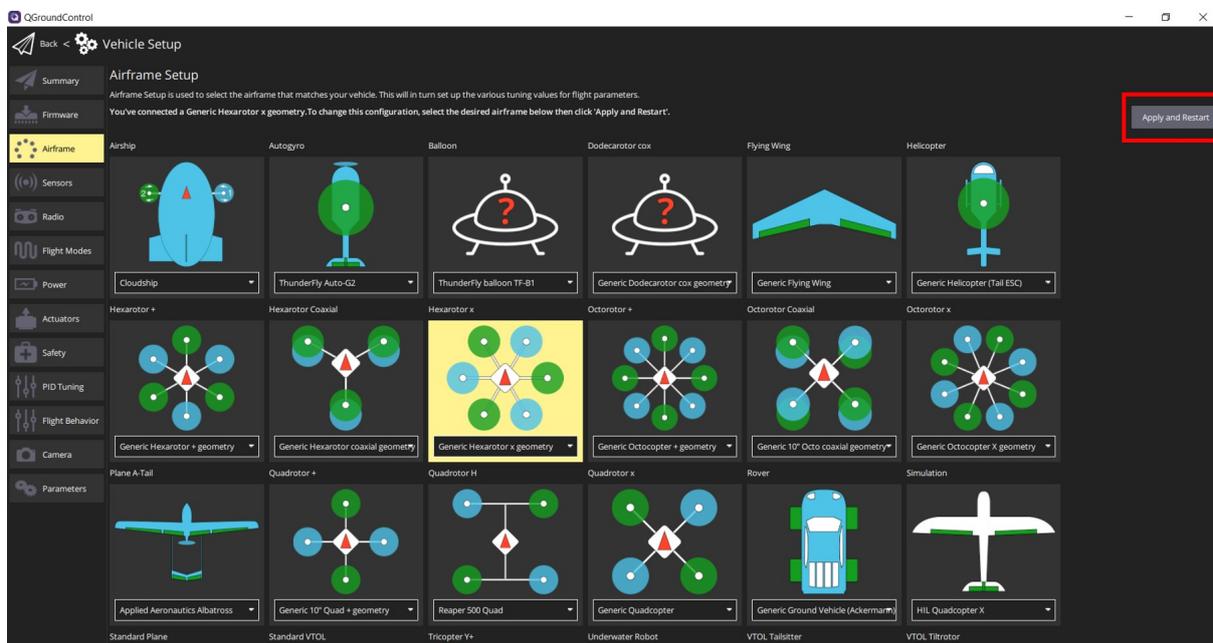


Figura 3.15: Selección del *airframe* en QGroundControl

Fuente: elaboración propia

3.2.3. Calibración de sensores

La calibración de los sensores es un paso crítico para garantizar un vuelo estabilizado y nivelado de la aeronave. En esta etapa, se calibran los principales sensores del controlador de vuelo: el magnetómetro, los acelerómetros y los giroscopios.

3.2.3.1. Calibración de la brújula

Para calibrar la brújula (magnetómetro), es necesario realizar manualmente una serie de movimientos con la aeronave en diferentes orientaciones (ver imagen 3.17). Las instrucciones de los movimientos requeridos se muestran en pantalla al iniciar el proceso de calibración, lo que guía al operador durante la configuración.

Antes de comenzar, es necesario especificar la orientación del controlador de vuelo en relación con la dirección de avance de la aeronave (ver imagen 3.16). Como se mencionó en apartados anteriores, alinear el Cube Orange con la dirección de vuelo de la aeronave facilita el proceso de configuración.

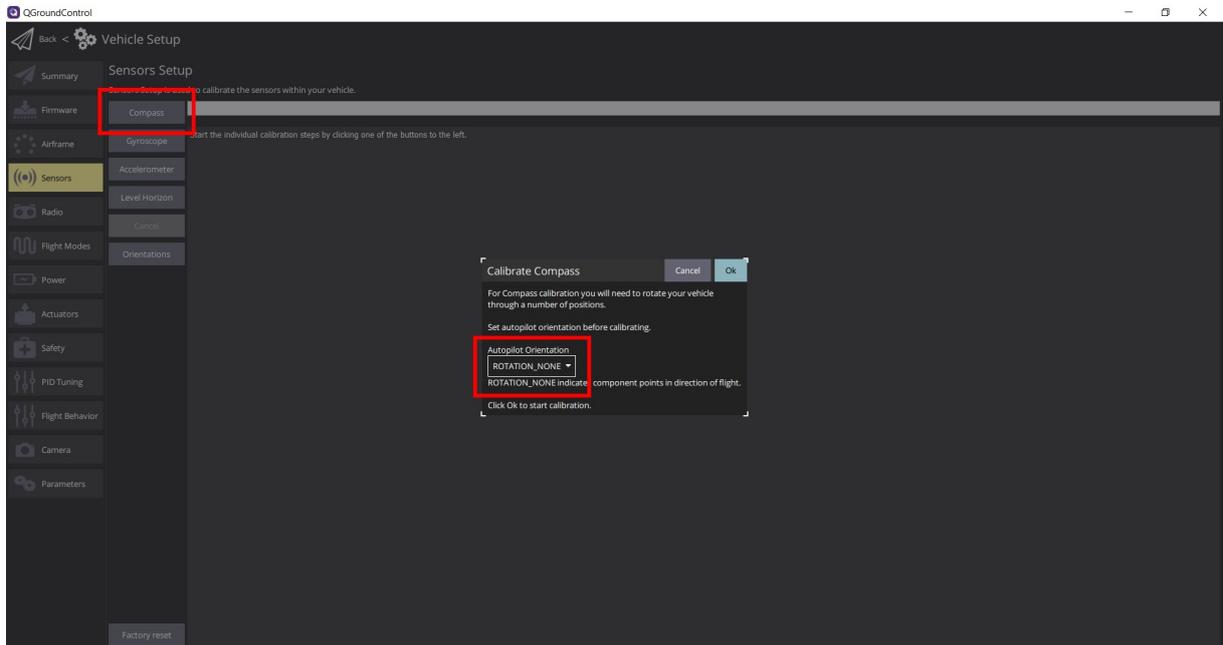


Figura 3.16: Selección de orientación para la calibración de la brújula en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

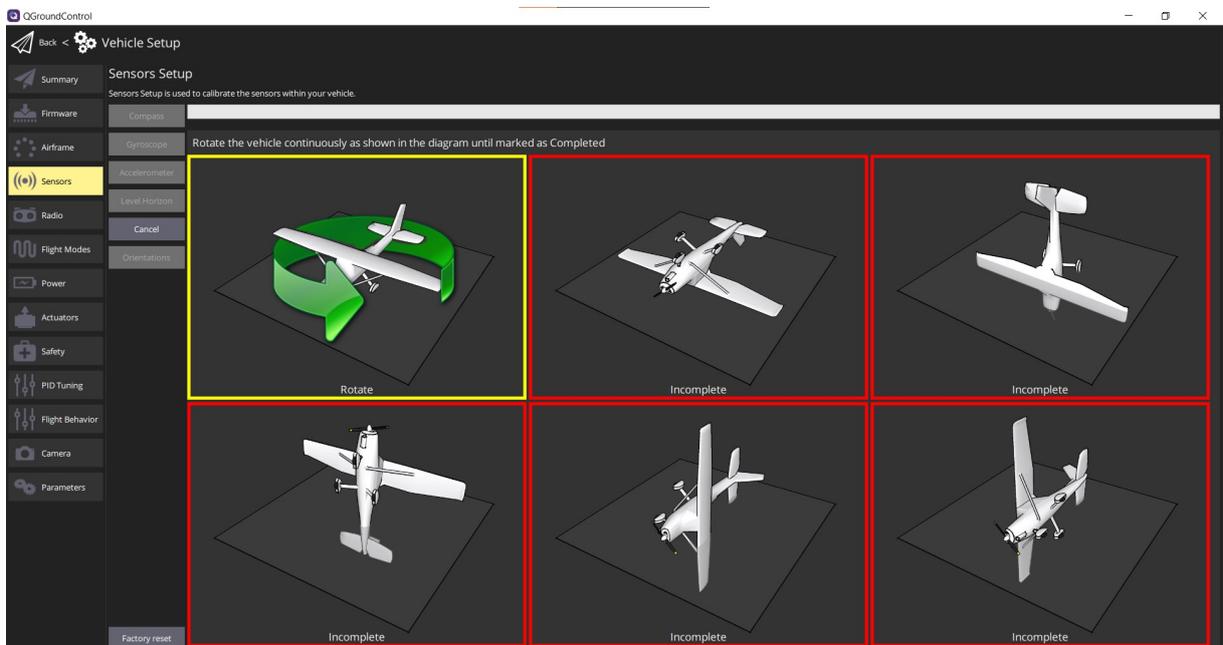


Figura 3.17: Calibración de la brújula en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

3.2.3.2. Calibración del giroscopio

La calibración del giroscopio requiere únicamente colocar la aeronave en posición de vuelo en una superficie plana, tal y como se posicionaría en el campo de vuelo antes de despegar.

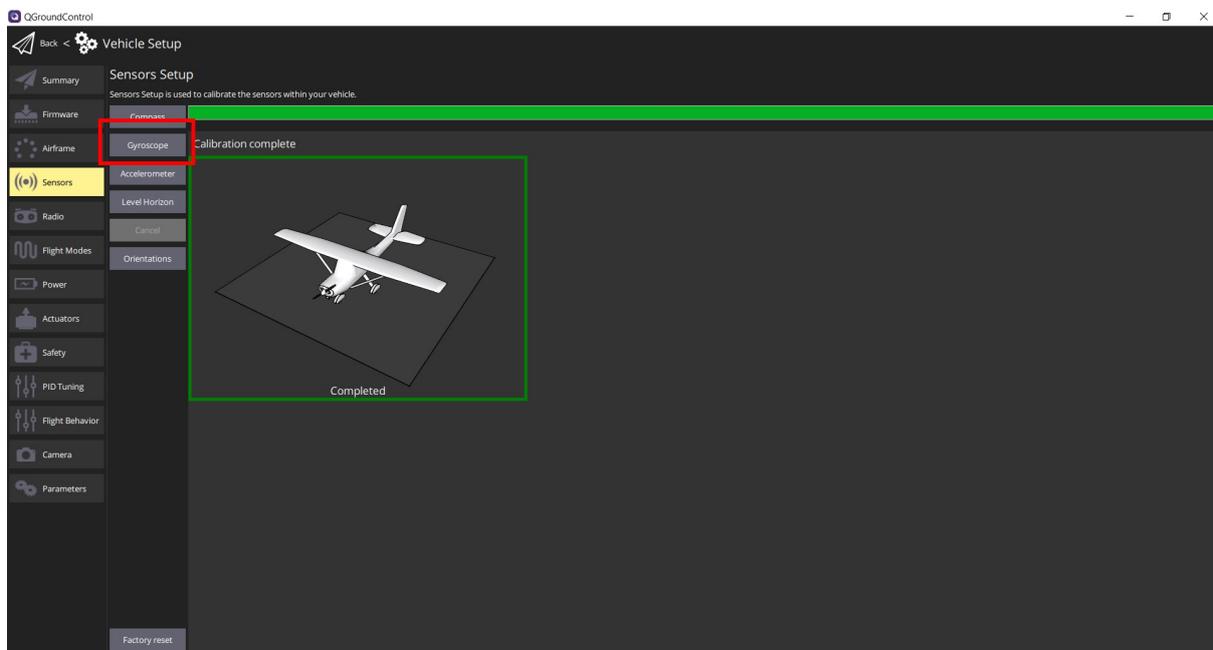


Figura 3.18: Calibración del giroscopio en QGroundControl.

Fuente: elaboración propia

3.2.3.3. Calibración del acelerómetro

Para calibrar el acelerómetro es necesario colocar la aeronave en diferentes posiciones, las cuales se muestran en pantalla al iniciar el proceso (ver imagen 3.20).

A diferencia de la calibración del magnetómetro, esta calibración se realiza de manera estática. Además, también es necesario indicar la posición del autopiloto con respecto a la dirección de avance de la aeronave (ver imagen 3.19).

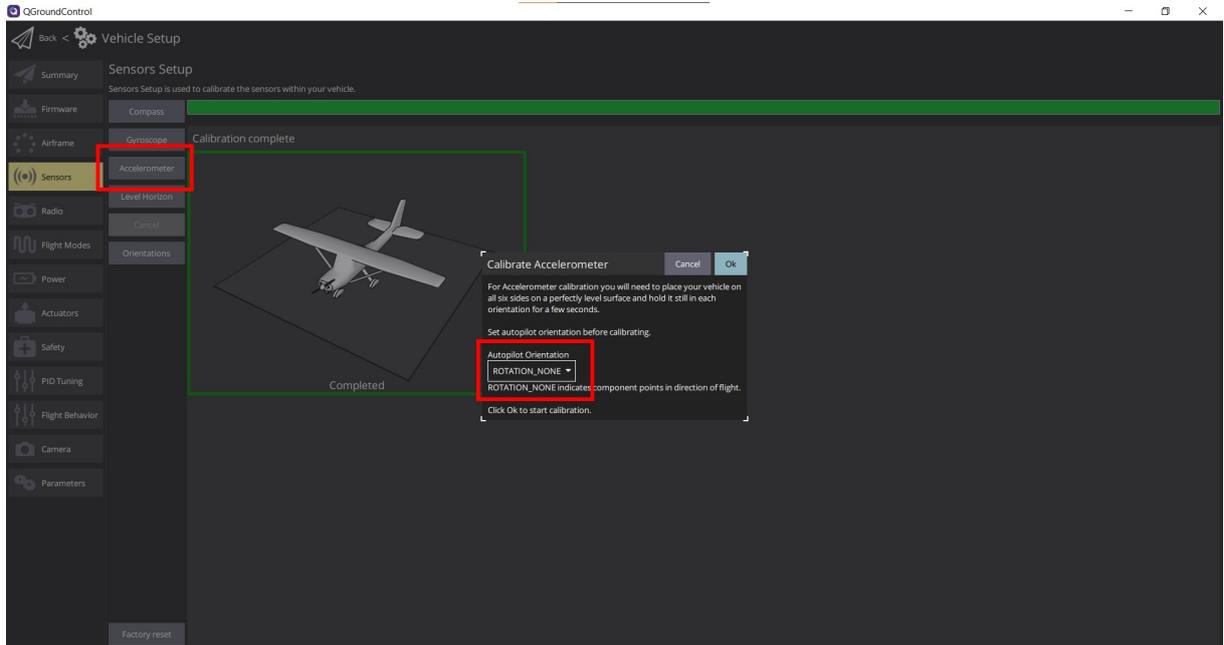


Figura 3.19: Selección de la orientación del autopiloto en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

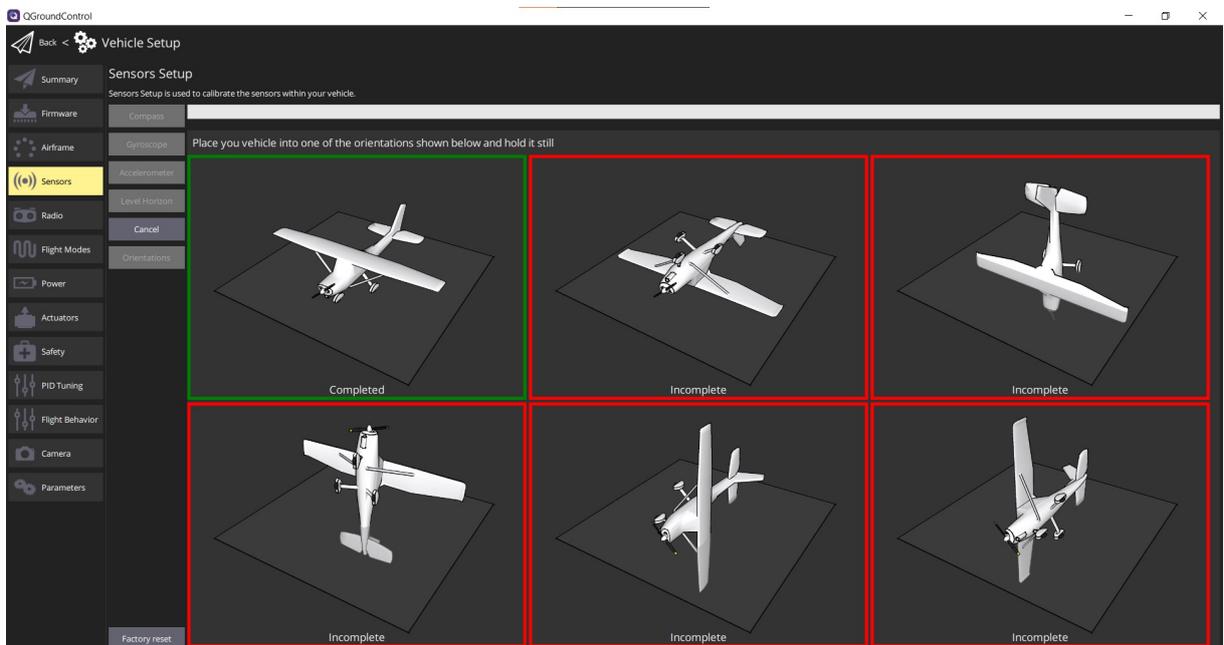


Figura 3.20: Calibración del acelerómetro en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

3.2.4. Configuración de radio

El siguiente paso en la configuración de la aeronave es la configuración de la radio. Para realizar este proceso, es necesario conectar las baterías de la aeronave, ya que la unidad de aire Herelink recibe alimentación directamente desde las baterías a través del convertidor DC/DC.

La configuración de la radio se realiza a través de la estación de control terrestre Herelink. Al encender por primera vez la estación portátil Herelink, esta abrirá automáticamente el software QGroundControl, aunque no se emparejará de manera automática con la unidad de aire embarcada en la aeronave. Es necesario llevar a cabo un procedimiento de emparejamiento inicial para establecer la comunicación entre ambos dispositivos (ver imagen 3.21).

Para emparejar la estación de radiocontrol con la unidad de aire, se deben seguir los pasos siguientes:

1. Encender la estación de control terrestre Herelink
2. Alimentar la unidad de aire Herelink conectando las baterías de la aeronave
3. Acceder a la página de configuración del QGroundControl en la estación terrestre Herelink.
4. Seleccionar la pestaña “D2D Info” dentro del menú de configuración.
5. Pulsar el botón “Pair” en la estación terrestre.
6. Presionar el botón “Pair/Reset” de la unidad de aire durante 3 segundos utilizando un objeto punzante.

Tras completar este procedimiento, la estación de tierra Herelink quedará emparejada con la unidad de aire y ya se podrán comenzar a calibrar los *joystick* de la emisora de radio (ver imagen 3.22).

La calibración de los *joysticks* comienza seleccionando el botón “Calibrate” en la estación de control terrestre Herelink, dentro de la pestaña “Radio”. Una vez iniciado el proceso, el dispositivo mostrará instrucciones en pantalla, indicando las posiciones específicas a las que se deben mover los *joysticks*.

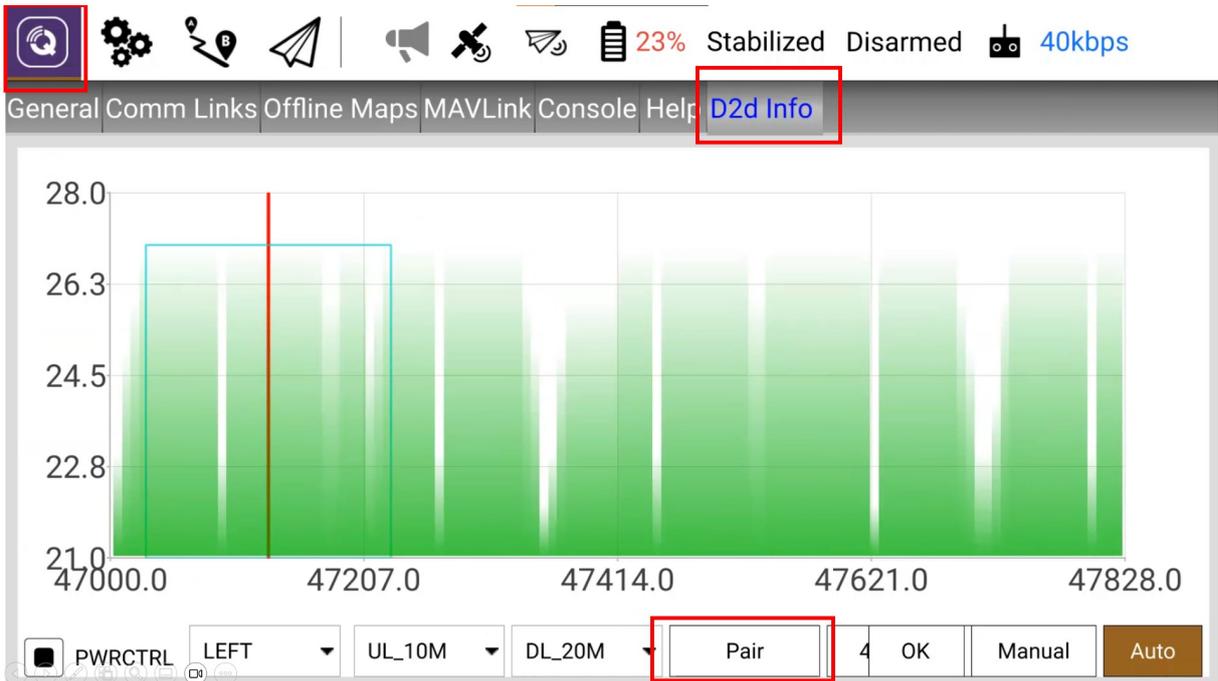


Figura 3.21: Emparejamiento de la unidad de aire Herelink con la estación terrestre.
Fuente: elaboración propia

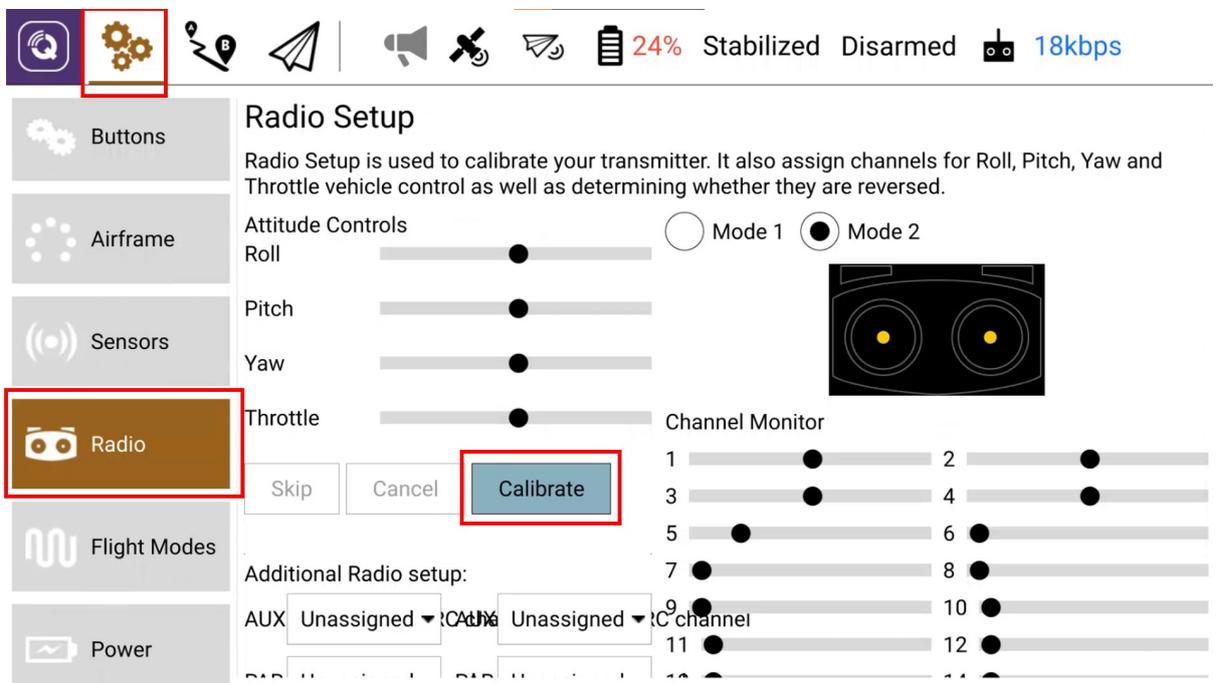


Figura 3.22: Calibración de los *joysticks* de la emisora de radio Herelink.
Fuente: elaboración propia

3.2.5. Configuración de modos de vuelo

La configuración de los modos de vuelo no es estrictamente necesaria para el funcionamiento correcto de la aeronave, pero permite asignar diferentes modos de vuelo a los botones de la emisora de radio. Esto facilita el cambio entre modos de manera más rápida y accesible durante la operación.

El siguiente procedimiento detalla cómo mapear los botones físicos de la emisora Herelink a los modos de vuelo disponibles en QGroundControl:

1. Desde la emisora Herelink, acceder a la pestaña “Buttons”
2. Seleccionar el número de botones que se desea utilizar en un canal específico, como el CH5 en este caso.
3. Pulsar el botón “Settings” y seleccionar los botones físicos que se quieren utilizar.
4. Continuar el proceso en QGroundControl desde el ordenador.
5. En la pestaña “Flight Modes”, asociar un modo de vuelo a cada botón físico de la emisora.
6. Para verificar qué botón está vinculado a cada modo de vuelo, basta con pulsar el botón físico correspondiente, y el modo de vuelo seleccionado se iluminará de color amarillo.

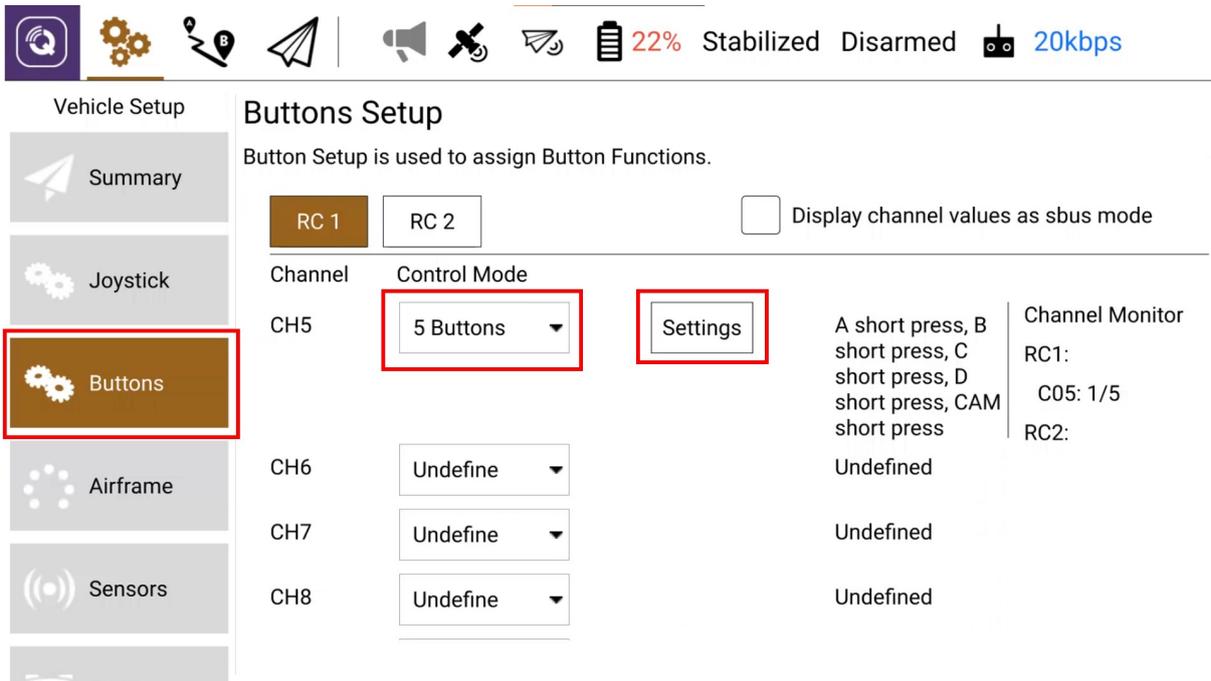


Figura 3.23: Pasos 1 y 2 de la configuración de botones del Herelink.
Fuente: elaboración propia

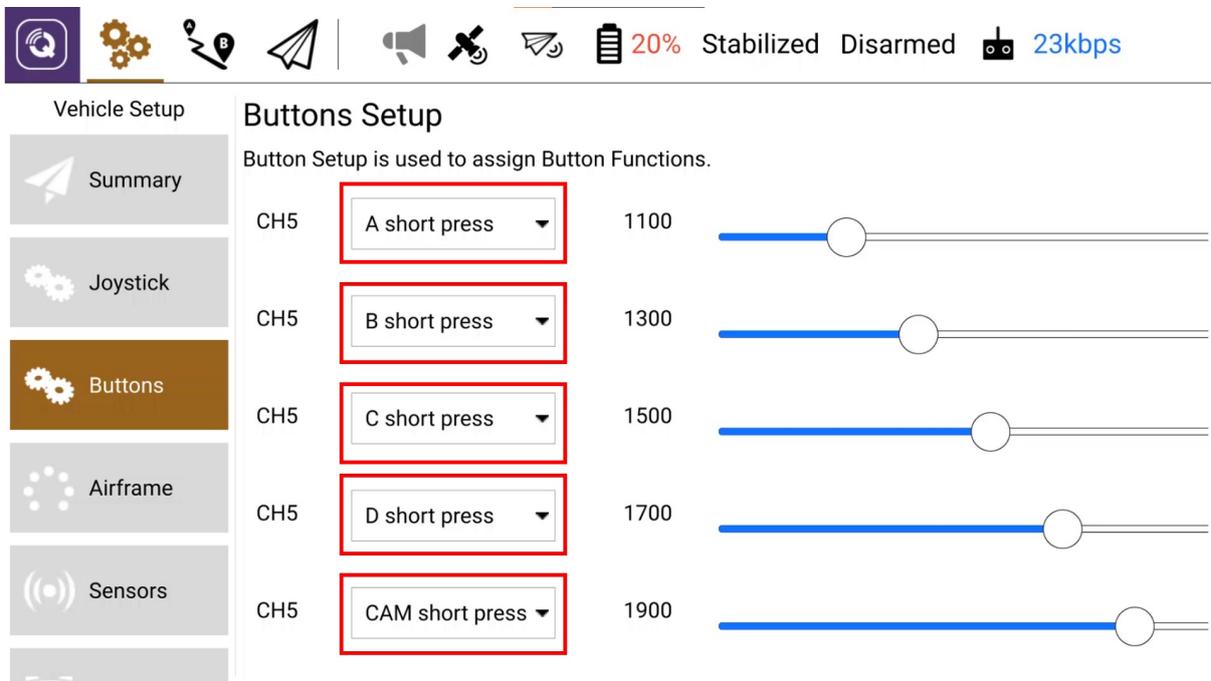


Figura 3.24: Paso 3 de la configuración de botones del Herelink.
Fuente: elaboración propia



Figura 3.25: Pasos 4, 5 y 6 de la configuración de botones del Herelink.
Fuente: elaboración propia

3.2.6. Configuración de la unidad de potencia

En la pestaña de configuración “Power” del QGroundControl, se definen los parámetros físicos de las baterías utilizadas en la aeronave. Esta configuración es esencial para que el software pueda calcular con precisión el porcentaje de carga restante de las baterías en tiempo real. Además, permite que la aeronave tome medidas específicas en caso de baja batería, según las acciones programadas previamente por el usuario.

Los parámetros que deben configurarse incluyen el número de celdas de cada batería, el voltaje mínimo por celda (considerado como vacío) y el voltaje máximo por celda (considerado como lleno).

El voltaje máximo y mínimo por celda está definido en la hoja de datos proporcionada por el fabricante de la batería. En este caso, el fabricante especifica que cada celda no debe cargarse por encima de 4,2 V ni descargarse por debajo de 3,7 V, para garantizar la salud y la vida útil de la batería.

Si se utilizan dos baterías, conviene que ambas tengan las mismas especificaciones y se deben conectar en paralelo antes de alimentar la placa de distribución de potencia y el convertidor de voltaje DC/DC. No es necesario configurar ambos campos de batería, ya que al conectar dos baterías idénticas en paralelo, el sistema de gestión de energía del Cube Orange percibe ambas como una única fuente de energía combinada.

Los parámetros “Voltage divider” y “Amps per volt” no se deben modificar, a menos que exista una discrepancia significativa entre las mediciones de voltaje e intensidad proporcionadas por fuentes externas y los valores indicados en QGroundControl.

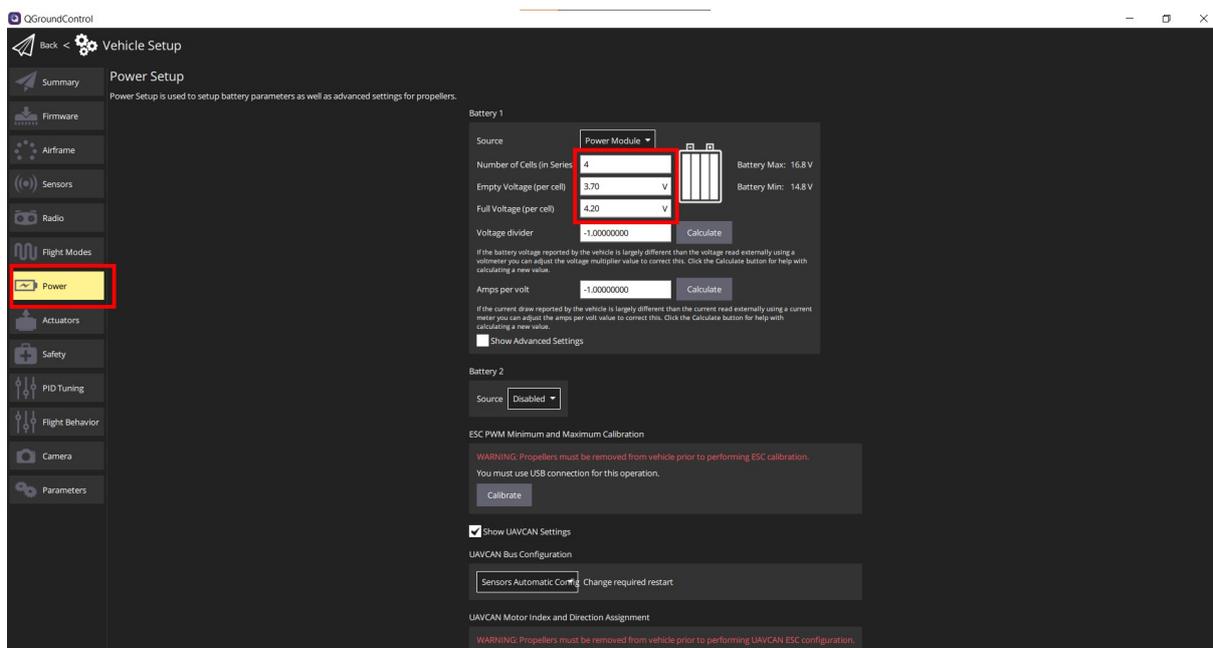


Figura 3.26: Configuración de las batería en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

3.2.7. Configuración de actuadores

La configuración de actuadores en QGroundControl es un paso fundamental para garantizar el funcionamiento adecuado de los motores en un sistema multirroto. En esta sección del software, se define la geometría del dron, se asignan los motores a las salidas PWM del controlador de vuelo y se realizan pruebas para validar que cada motor responde correctamente. Cabe mencionar que este proceso de configuración se debe realizar en todo momento con las hélices retiradas

En primer lugar, se establece la geometría del dron en la sección de configuración. En el caso de un hexacóptero, se selecciona la opción correspondiente para reflejar que el sistema está compuesto por seis motores. Para cada motor, se especifica su posición relativa al centro de gravedad del dron utilizando coordenadas X e Y, tal y como se muestra en la figura 3.27. Además, se define la dirección de rotación de cada motor, ya sea en sentido horario (CW) o antihorario (CCW).

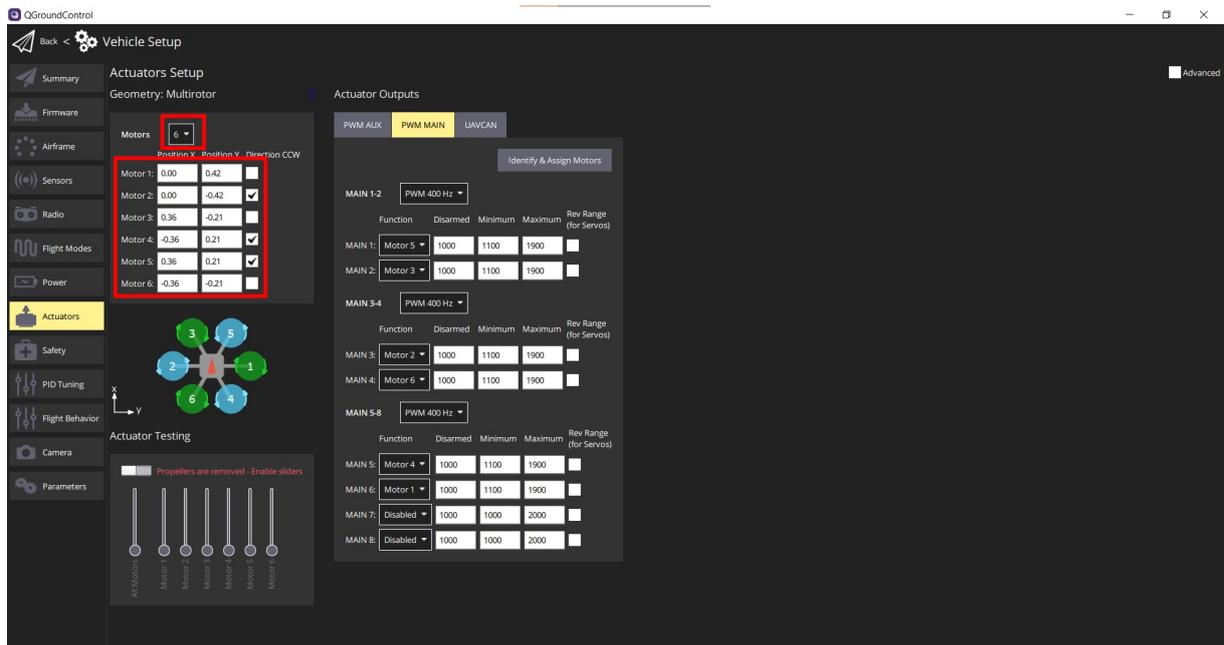


Figura 3.27: Definición de la geometría y posición de motores en QGroundControl.

Fuente: elaboración propia

La asignación de los motores a las salidas del controlador de vuelo se realiza en la sección de salidas de “Actuators Outputs”. Cada motor se debe vincular con un canal específico del controlador, desde “MAIN 1” a “MAIN 6”, en función de cómo se encuentren conectados en la placa de distribución de potencia.

Existe una herramienta de asignación semi-automática muy útil para identificar a qué motor corresponde cada salida PWM del controlador. A continuación, se detallan los pasos que se deben realizar para realizar la asignación correctamente:

1. Hacer clic en el botón “Identify & Assign Motors” en la sección de configuración de actuadores.
2. El sistema hará que uno de los motores comience a girar.
3. Identificar el motor que acaba de girar y asignarlo al canal correspondiente en la lista de salidas “PWM MAIN”.
4. Repetir el procedimiento para cada motor hasta completar la asignación de todos ellos.

A continuación, se definen los rangos de señal PWM para cada motor, incluyendo el valor mínimo necesario para que comiencen a girar, el valor máximo para alcanzar la máxima velocidad y el valor desarmado, que corresponde a cuando los motores están

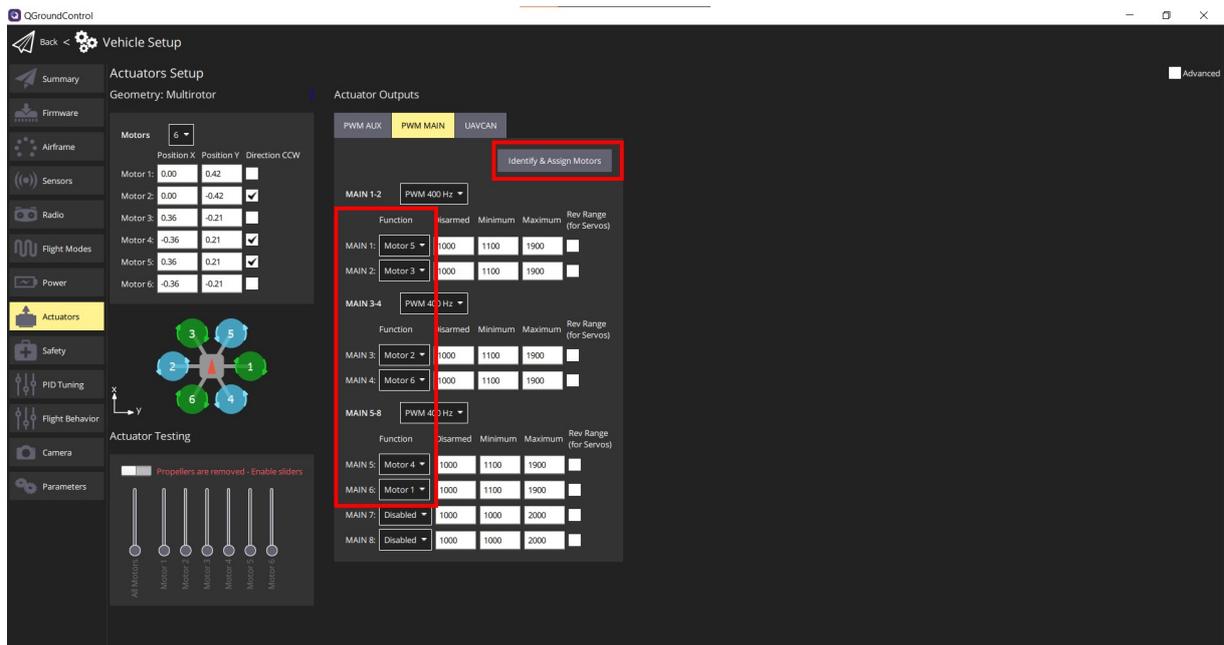


Figura 3.28: Asignación de salidas PWM a motores en QGroundControl.

Fuente: elaboración propia

desactivados. Estos valores están comprendidos entre $1.000 \mu s$ y $2.000 \mu s$ para la gran mayoría de fabricantes de ESCs. Para los ESCs utilizados, el fabricante indica que el rango de señal de PWM se encuentra entre $1.100 \mu s$ y $1.900 \mu s$.

En caso de no disponer de la información proporcionada por el fabricante, es posible ajustar el rango de señal utilizando los controles deslizantes en la sección “Actuator Testing”. Este ajuste debe realizarse asegurando que no exista un rango muerto ni al inicio ni al final del control. Al comenzar a desplazar el control, los motores deben iniciar su movimiento de inmediato, y al alcanzar el final del recorrido, los motores deben operar a su velocidad máxima. Además, esta función permite comprobar que la asignación de motores se ha realizado de forma correcta (ver imagen 3.29).

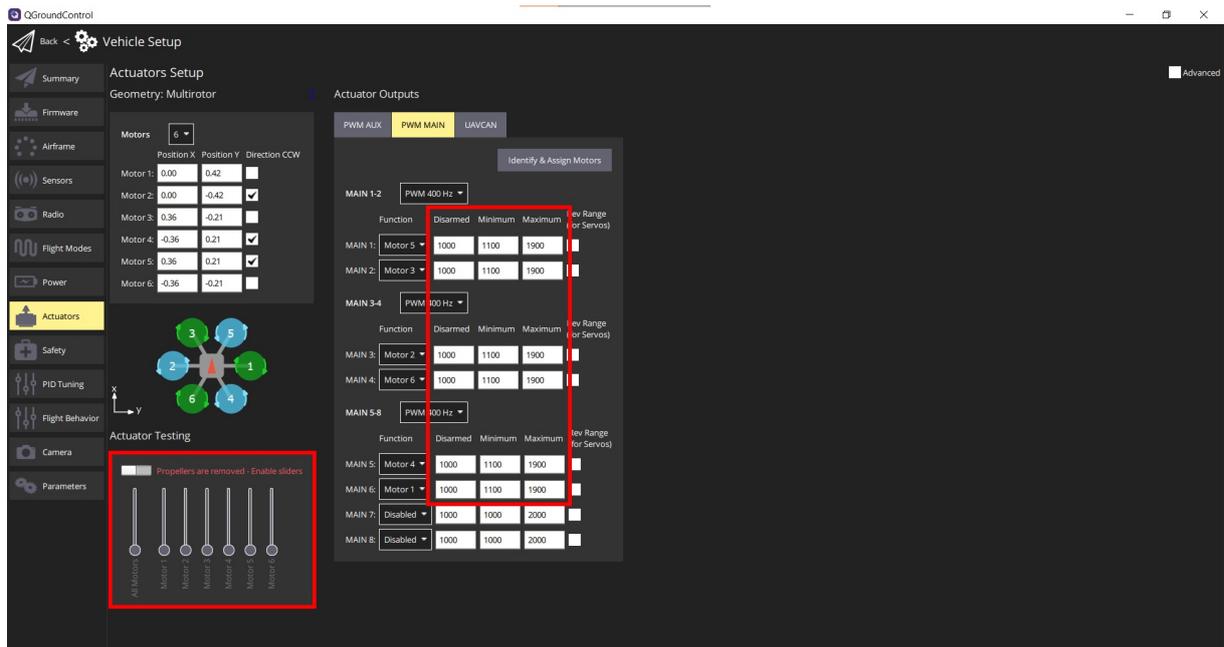


Figura 3.29: Ajuste del rango de señal PWM y testeo de motores en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

3.2.8. Parámetros

La pestaña de parámetros en QGroundControl ofrece al usuario acceso completo a una amplia gama de configuraciones del controlador de vuelo. Esta funcionalidad avanzada es una de las principales ventajas de los controladores de vuelo basados en firmware de código abierto como PX4, ya que proporciona un nivel de flexibilidad difícil de encontrar en sistemas propietarios. Realmente, todas las configuraciones y calibraciones realizadas en los apartados anteriores implican la modificación de cientos de parámetros del controlador de vuelo, sólo que su configuración se realiza en diferentes pestañas que optimizan la interfaz de usuario (ver imagen 3.30).

Dada la cantidad de parámetros disponibles, resulta inviable abarcar todos los detalles y configuraciones posibles dentro del contexto de este proyecto. No obstante, en el capítulo siguiente se analizarán algunos parámetros relevantes que se han ajustado manualmente a medida que surgía la necesidad de optimizar el sistema o resolver problemas específicos durante las pruebas de vuelo.

Cabe destacar que, tras haber completado todas las configuraciones descritas en este capítulo, la aeronave debería estar en condiciones de armarse y operar en todos los modos de vuelo disponibles. De este modo, dicha configuración establece un punto de partida funcional para la operación del hexacóptero, mientras que los ajustes avanzados permiten perfeccionar su rendimiento y adaptarlo a las necesidades particulares de cada misión.

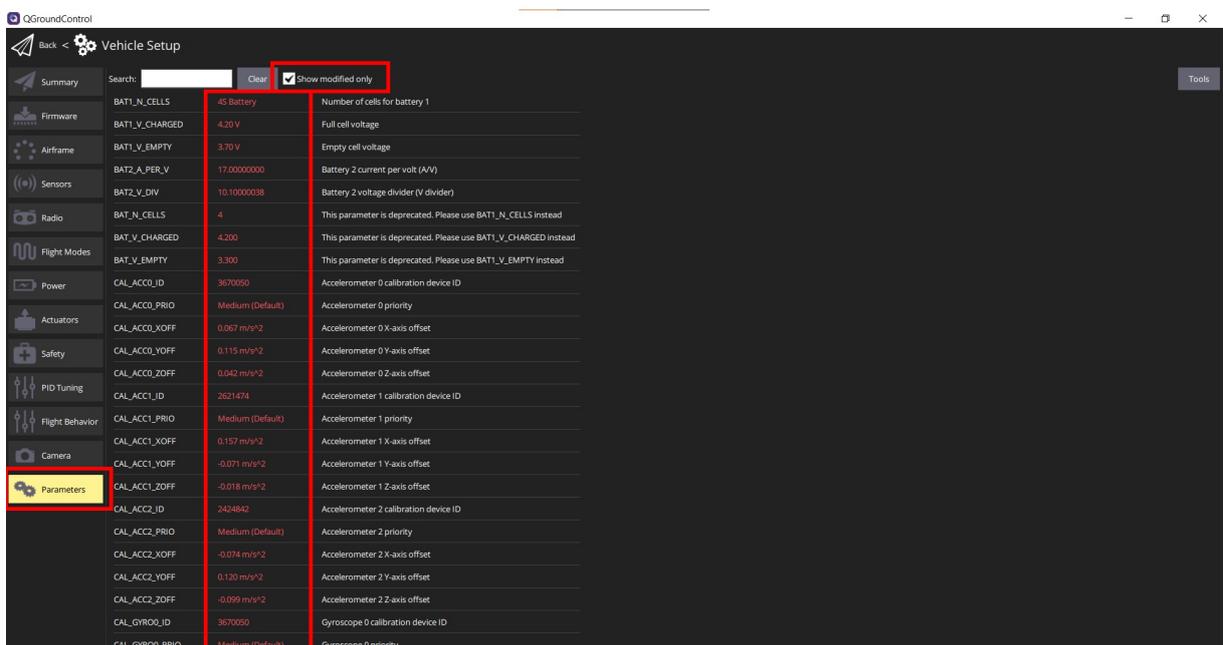


Figura 3.30: Parámetros modificados durante la configuración de sistemas.

Fuente: elaboración propia

Capítulo 4

Vuelo en campo

4.1. Modos de vuelo en QGroundControl

Los modos de vuelo en QGroundControl ofrecen soporte al autopiloto para facilitar el control manual de la aeronave, automatizar tareas comunes como despegues y aterrizajes, ejecutar misiones autónomas o delegar el control de vuelo a sistemas externos. Estos modos están diseñados para adaptarse a diferentes escenarios operativos y estilos de pilotaje, permitiendo tanto un control manual con distintos niveles de asistencia como una autonomía total gestionada por el autopiloto.

Los modos de vuelo se clasifican principalmente en dos categorías: manuales y autónomos. Los modos manuales permiten al piloto operar la aeronave con los *joysticks* de la emisora, mientras que los modos autónomos permiten al sistema asumir el control completo de la aeronave. Dependiendo del modo seleccionado, las condiciones de vuelo pueden requerir información adicional, como posición GPS o datos de sensores de actitud, y las transiciones entre modos estarán condicionadas por la disponibilidad de estos datos.

A continuación, se describen los modos de vuelo más comúnmente utilizados.

4.1.1. Modos manuales

- Position Mode: es el modo más fácil y seguro para vehículos con GPS. Controla la aceleración sobre el terreno y mantiene la posición al soltar los *joysticks*, frenando activamente la aeronave y bloqueándola en su posición actual.
- Altitude Mode: modo sin GPS que nivela la aeronave al soltar los *joysticks*, manteniendo la altitud, pero permitiendo el movimiento con la inercia y el viento. Similar al modo de vuelo “Position Mode” pero sin bloquear la posición horizontal por GPS.
- Manual/Stabilized: nivela la postura horizontal al soltar los *joysticks*, pero no controla la altitud ni la posición, dejando que la aeronave se desplace según el momento y las

condiciones del entorno. Hay que tener especial cuidado al utilizar este modo de vuelo con el Herelink, ya que los *joysticks* son autocentrables, y soltarlos implica la caída de la aeronave.

4.1.2. Modos autónomos

- Hold: detiene la aeronave y la mantiene en su posición actual, tanto vertical como horizontal, compensando el viento y otras fuerzas externas.
- Return: Lleva la aeronave a una altitud segura, vuela hacia un punto seguro (como el punto de origen) y aterriza. Requiere de GPS.
- Takeoff: realiza un despegue vertical y cambia automáticamente al modo “Hold”.
- Land: realiza un aterrizaje inmediato.
- Mission: ejecuta un plan de vuelo predefinido cargado previamente en el controlador de vuelo. Requiere GPS. Este modo de vuelo está relacionado directamente con el objetivo final del proyecto.

Si bien es cierto que existen otros modos de vuelo más complejos, estos son los de mayor relevancia para el desarrollo del proyecto.

4.2. Pruebas de vuelo manual y comprobaciones previas al vuelo autónomo

Antes de realizar un vuelo autónomo, es esencial llevar a cabo una serie de comprobaciones iniciales en modos de vuelo manual, con el propósito de evaluar la estabilidad y el comportamiento de la aeronave. Estas pruebas preliminares permiten confirmar que el sistema responde adecuadamente a las entradas del piloto.

Una vez configurado el hexacóptero tal y como se ha indicado en el capítulo anterior, se procedió a cargar las baterías al máximo y a trasladar la aeronave a un hangar con señal GPS suficiente para realizar las primeras pruebas de vuelo. Las pruebas comenzaron utilizando el modo de vuelo “Stabilized”, debido a que este modo proporciona asistencia básica del autopiloto, estabilizando la aeronave en el eje horizontal, pero dejando al operador el control directo de la altitud y la orientación.

Para volar en modo “Stabilized”, es necesario configurar el *joystick* de la estación de control Herelink en el modo “*center stick is zero throttle*”, donde la posición centrada del joystick representa un empuje del 0%. Esta configuración se llevó a cabo desde la pestaña de configuración “Joystick” del Herelink (ver imagen 4.1).

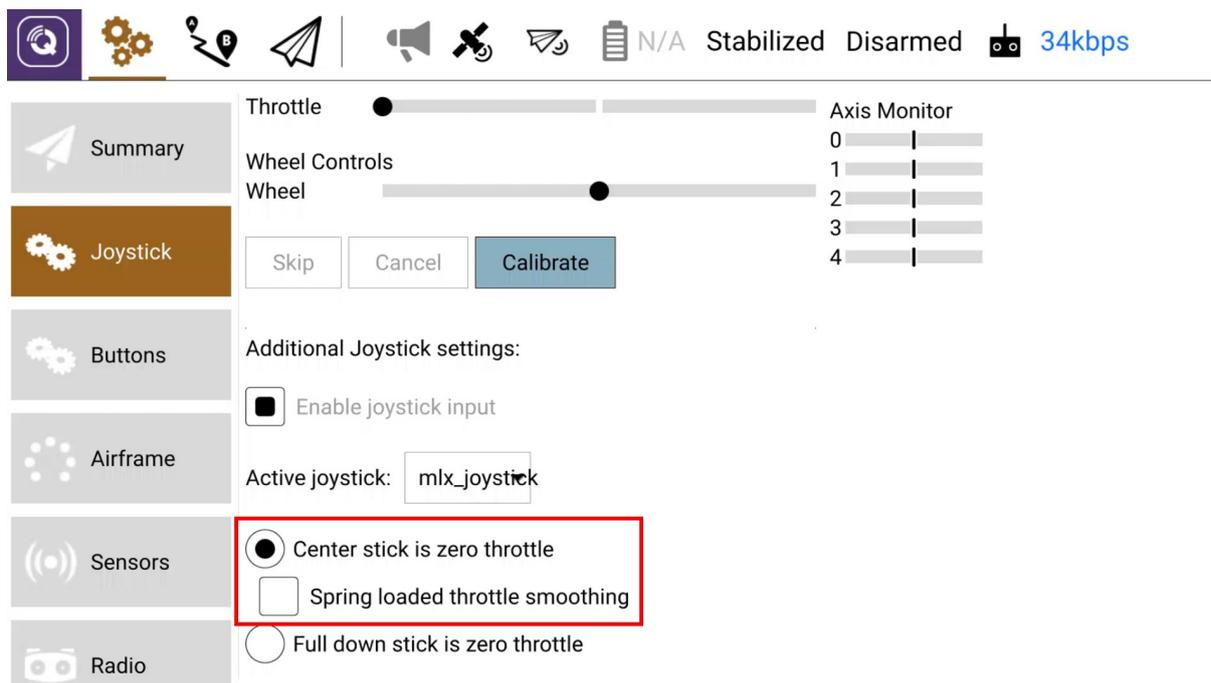


Figura 4.1: Ajuste del parámetro "center stick is zero throsttle" en Herelink.
Fuente: elaboración propia

Tras este ajuste, se armó la aeronave y se aumentó gradualmente el empuje hasta que el vehículo estuviera cerca de despegar del suelo. En este estado, se verificó que la aeronave mostrara estabilidad antes de realizar otros movimientos.

Posteriormente, se movió el *joystick* derecho para realizar movimientos de cabeceo y alabeo. En este punto, la aeronave debe mostrar una tendencia a inclinarse según los controles del piloto, aun estando en contacto con el suelo. Tras haber verificado que el hexacóptero respondía correctamente a las entradas del piloto, se procedió al despegue vertical. Para ello, se soltó completamente el *joystick* derecho y se aumentó gradualmente el empuje hasta que la aeronave despegara del suelo, evaluando su estabilidad en vuelo estacionario.

Durante las pruebas iniciales, se observaron ciertas inestabilidades relacionados con el control manual. En el modo de vuelo "Stabilized", y en condiciones de ausencia de viento, la aeronave debe mantenerse estable en su posición horizontal cuando el *joystick* derecho no presenta movimientos. Sin embargo, es común observar ligeras oscilaciones en altitud debido al uso de *joysticks* autocentrables. En esta ocasión, se identificaron oscilaciones horizontales pronunciadas y un control difícil de la aeronave que indicaban falta de configuración. Este comportamiento sugería la necesidad de ajustar ciertos parámetros en el sistema para mejorar la estabilidad, así como de realizar una re-calibración de los sensores de la IMU.

Para abordar las oscilaciones observadas en el vuelo inicial, se conectó nuevamente la aeronave al ordenador para realizar una recalibración de la IMU integrada en el controlador de vuelo. Este proceso siguió los pasos descritos en el apartado 3.2.3, prestando especial atención a que los movimientos durante la calibración se efectuaran lo más alineados posible de los ejes de giro teóricos de cada uno de ellos.

Tras completar la recalibración, se realizó una nueva prueba de vuelo manual en modo “Stabilized”. Los resultados evidenciaron una notable mejora en la estabilidad de la aeronave en ausencia de movimientos de cabeceo y alabeo, así como un control más suave y preciso al realizar dichos movimientos. Esto subrayó la relevancia de una calibración precisa de los sensores inerciales para lograr un control estable en aeronaves multirrotores. Aunque existen otros factores que pueden influir en el comportamiento del vuelo, esta experiencia refuerza la recomendación de realizar múltiples iteraciones de calibración en caso de detectar inestabilidades en vuelo estacionario.

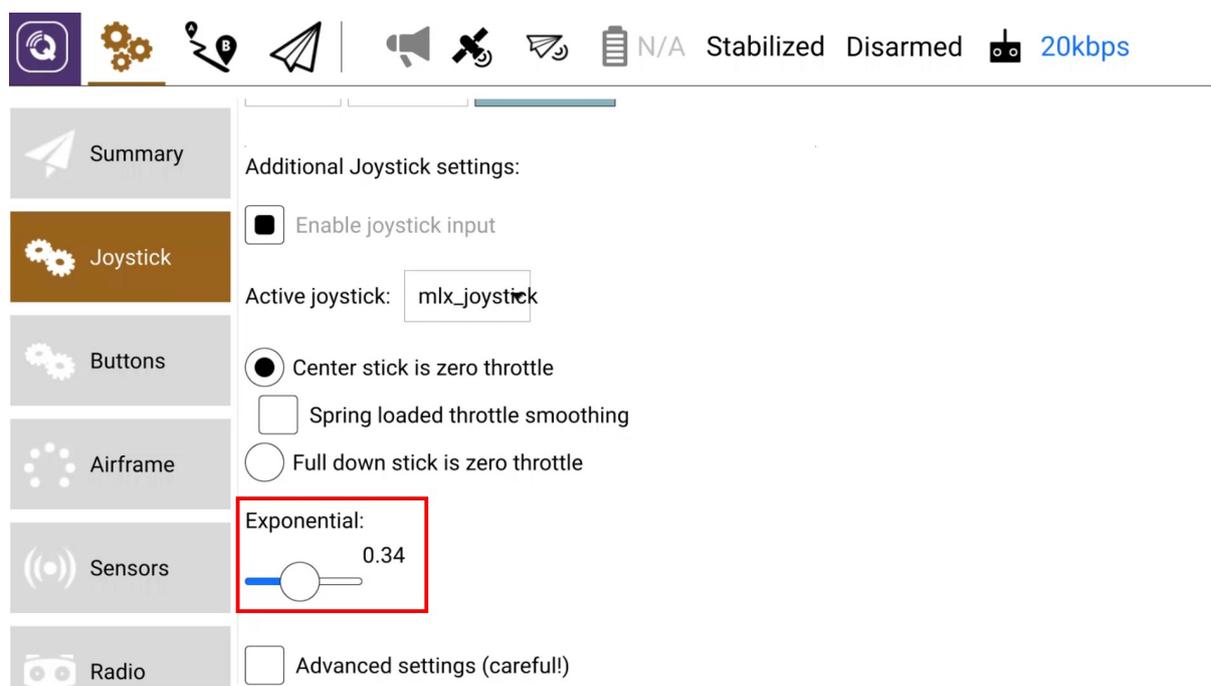


Figura 4.2: Ajuste del *joystick* exponencial en Herelink.
Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, para suavizar los movimientos bruscos observados al operar los *joysticks*, se procedió a ajustar su configuración, implementando un comportamiento exponencial en el recorrido (ver imagen 4.2. Este ajuste implica que la primera parte del recorrido del *joystick* tiene un menor impacto en la señal de salida, mientras que la última parte del recorrido afecta más significativamente. Este cambio resultó en un control más preciso y

progresivo de la aeronave, especialmente en el centro del recorrido de los *joysticks*, lo que mejoró considerablemente maniobrabilidad del hexacóptero.

Tras realizar dichos ajustes, se determinó que la aeronave estaba lista para volar en otros modos de vuelo no manual.

4.3. Planificación y ejecución de misiones de vuelo autónomo

El software QGroundControl es una herramienta versátil utilizada para planificar y supervisar misiones de vuelo autónomo en sistemas aéreos no tripulados. Diseñado para proporcionar una interfaz intuitiva y funcional, QGC permite a los operadores configurar rutas, cargar parámetros de vuelo, y monitorizar en tiempo real la ejecución de misiones. La “*Plan View*” dentro de la interfaz gráfica del software es el punto de partida para planificar misiones autónomas, ya que permite diseñar rutas y cargarlas al vehículo. Además, esta vista es utilizada para configurar el otros planes de vuelo autónomo como el “*GeoFence*” o los “*Rally Points*”, si son compatibles con el firmware. Una vez que la misión está planificada y cargada en el vehículo, se cambia a la “*Fly View*” para ejecutar la misión.

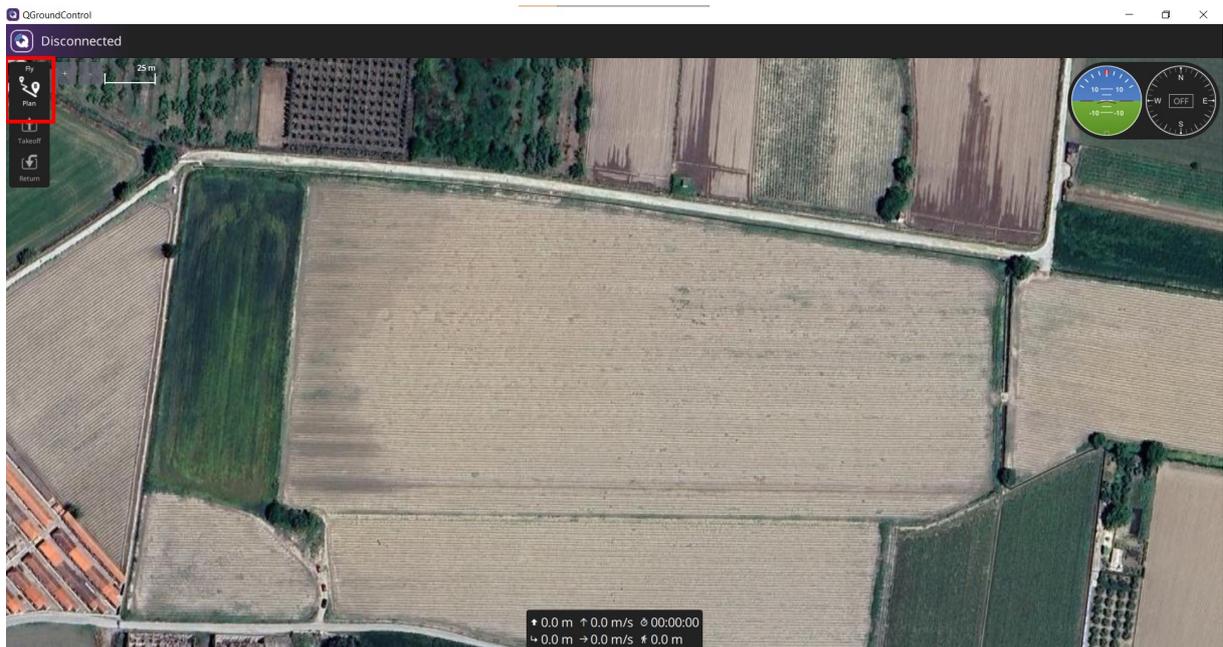


Figura 4.3: Selección de la visión de planificación en QGroundControl.

Fuente: elaboración propia

Una vez seleccionada la visión de “*Plan View*” se debe seleccionar el mapa “*Blank*” para comenzar la planificación de la misión desde cero (ver imagen 4.4).

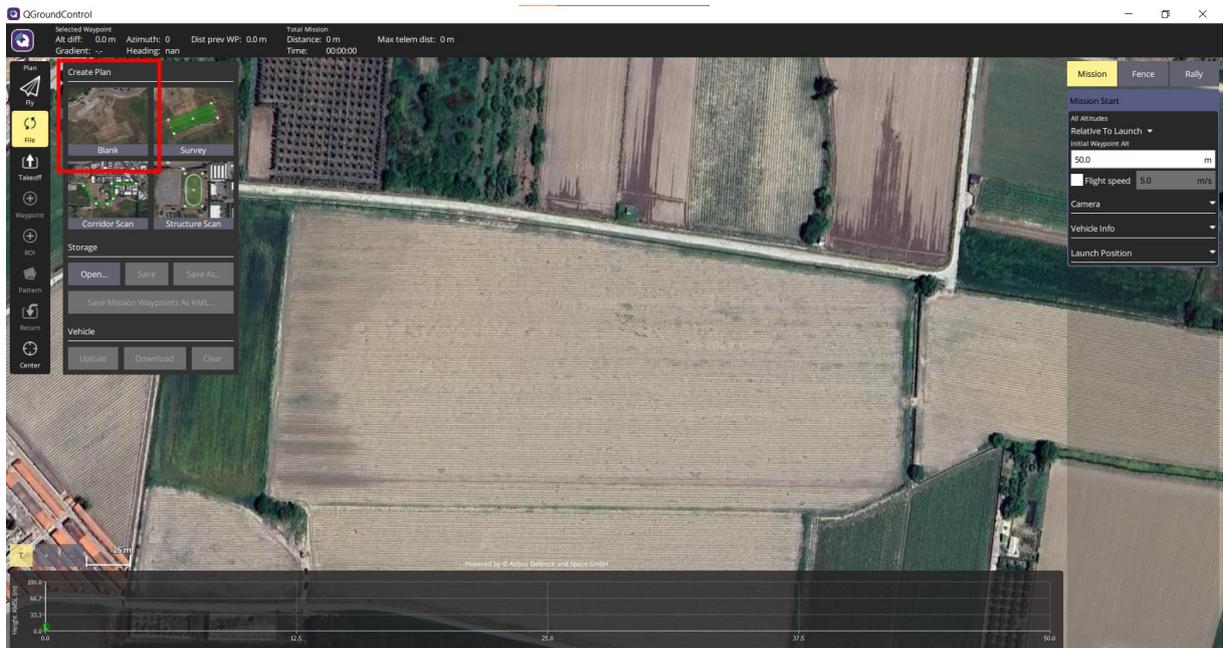


Figura 4.4: Vista de planificación en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

Los elementos principales de la interfaz de usuario son los siguientes:

1. Mapa: presenta los indicadores numerados correspondientes a la misión actual. Estos indicadores se pueden seleccionar para editar o arrastrar para reposicionar en el mapa.
2. Herramientas de Planificación: facilitan la creación y gestión de misiones, proporcionando opciones para añadir, modificar o eliminar elementos de la misión.
3. Lista de Comandos de Misión/Superposición: muestra la lista actual de elementos de misión. Los elementos se pueden seleccionar para realizar modificaciones específicas.
4. Superposición de Altitud del Terreno: representa gráficamente la altitud relativa de cada comando de misión en relación con el terreno. Este componente proporciona información sobre la altitud de los puntos seleccionados, asegurando una planificación adecuada con respecto al relieve del terreno.

La planificación de una misión de vuelo autónomo consiste, fundamentalmente, en definir un punto de partida, añadir puntos de paso (*waypoints*) o comandos específicos a lo largo de la trayectoria, y realizar las modificaciones necesarias para adaptarlos a los requerimientos particulares de cada misión.

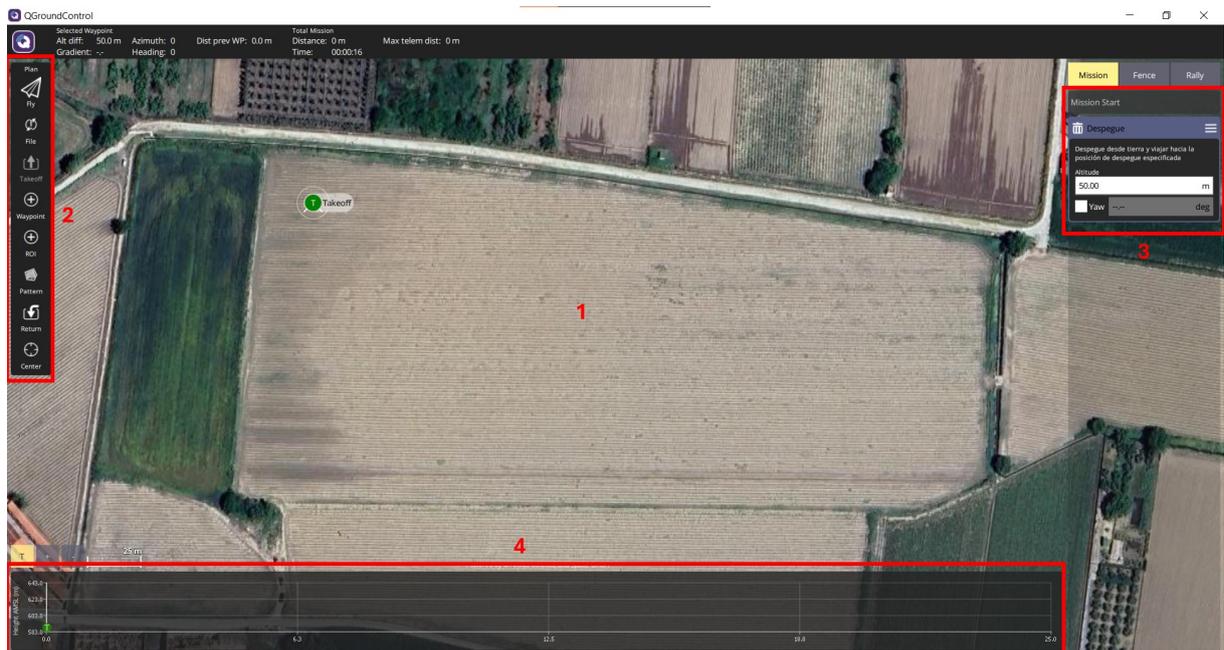


Figura 4.5: Interfaz de planificación de misiones en QGroundControl.

Fuente: elaboración propia

Este proceso implica no solo la ubicación precisa de cada punto en el espacio, sino también la configuración de parámetros asociados, como altitudes, velocidades, y acciones específicas que el vehículo debe ejecutar en cada *waypoint*.

Se comienza seleccionando el comando “*Takeoff*” de las herramientas de planificación y se ubica en el mapa el punto de despegue (ver imagen 4.6). Seguido de ello, se selecciona la herramienta “*Waypoints*” y se ubican en el mapa los distintos puntos de paso por lo que se desea que sobrevuele la aeronave (ver imagen 4.7).

Para ordenar a la aeronave a volver al punto de origen, basta con seleccionar la herramienta “*Return*” en la barra de herramientas de planificación (ver figura 4.8).

Una vez establecida la trayectoria, se pueden modificar ciertos parámetros de cada punto de paso como la altitud, la velocidad de vuelo, o acciones que debe realizar una posible cámara y *gimbal* instalados. En la gráfica de superposición de altitud del terreno se puede observar la altura relativa de la aeronave a medida que avanza en su trayectoria (ver figura 4.9).

La herramienta “*File*” se utiliza para transferir misiones entre la estación terrestre y el vehículo, así como para guardar y restaurar misiones desde archivos. Esta herramienta incluye una función de aviso que muestra un símbolo de “!” para indicar que existen cambios en la misión que aún no han sido enviados al vehículo. Es fundamental cargar cualquier

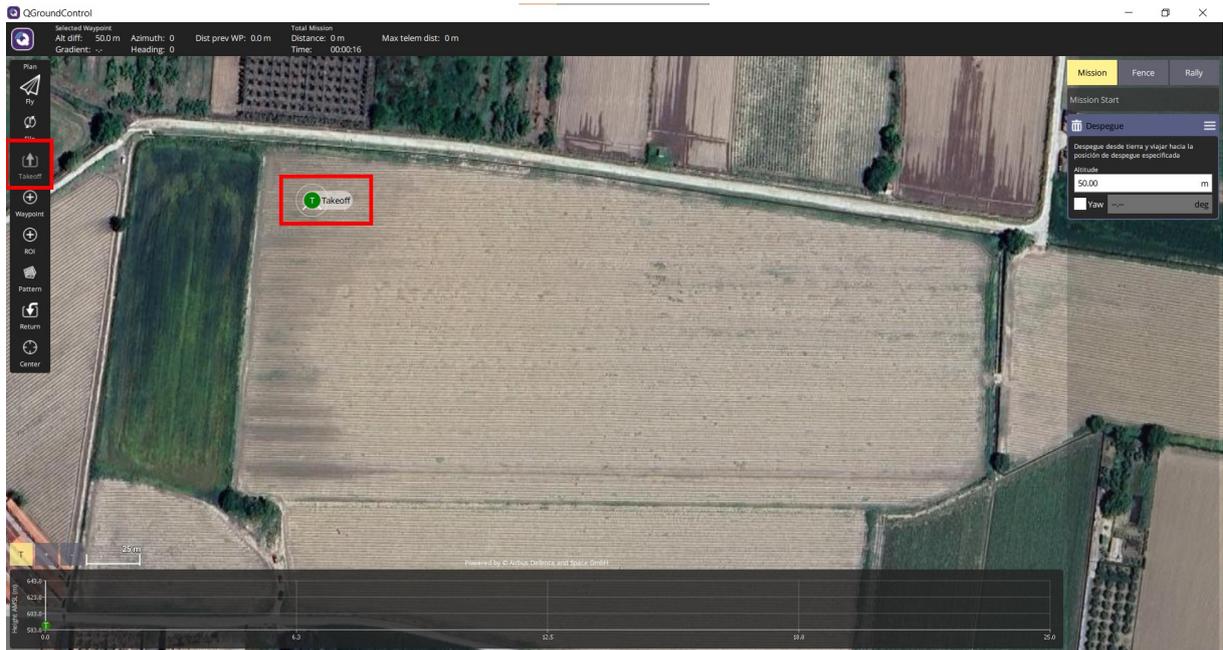


Figura 4.6: Punto de despegue en la planificación de misión en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

misión en el vehículo antes de iniciar el vuelo para garantizar su ejecución.

La herramienta “File” permite subir, descargar, guardar, o guardar como, planificaciones de misiones específicas, así como eliminar todos los *waypoints* de una planificación en curso. Cuando se finaliza una planificación de misión, se debe seleccionar el comando “Upload” para cargar dicha misión al vehículo conectado a la estación de control en tierra (ver imagen 4.10). Al finalizar este paso, la aeronave estará lista para realizar la misión de vuelo programada.

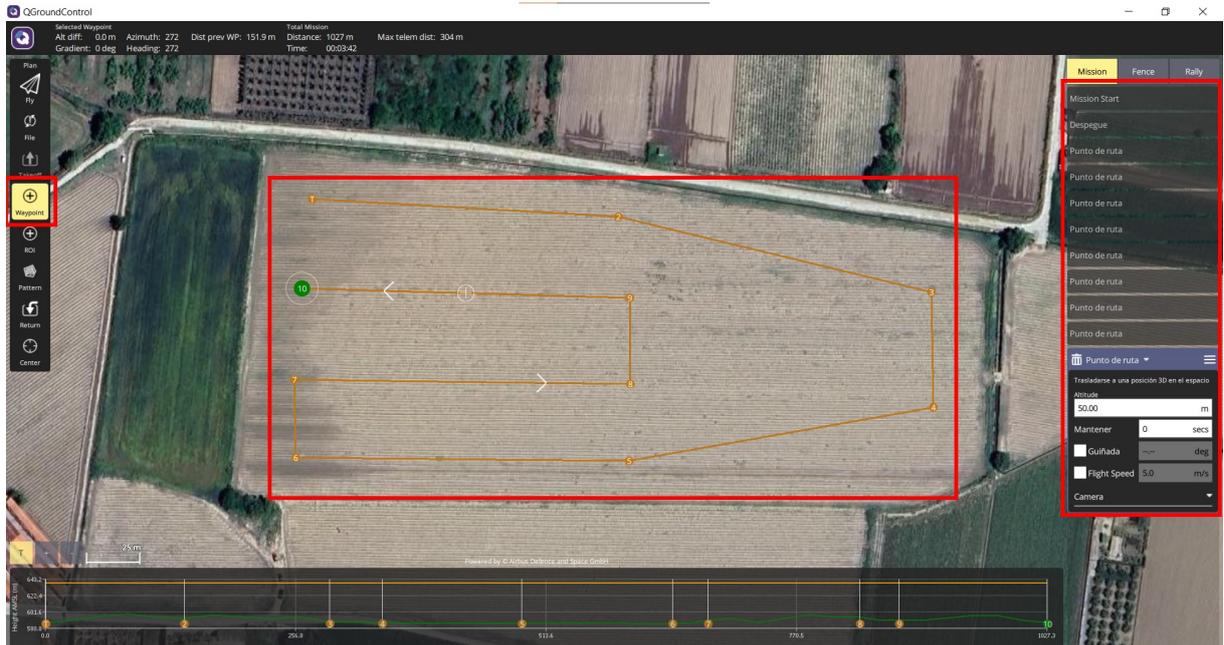


Figura 4.7: Puntos de paso en la planificación de misión en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

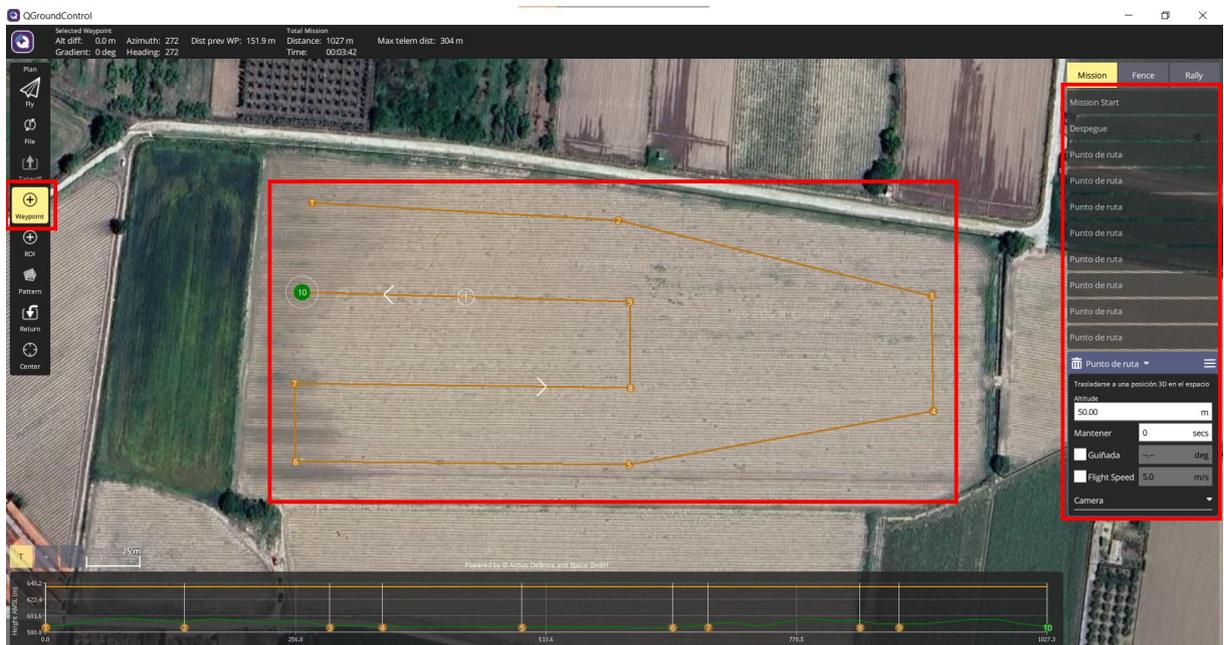


Figura 4.8: Vuelta al punto de despegue en la planificación de misión en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia



Figura 4.9: Edición de parámetros en la planificación de misión en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

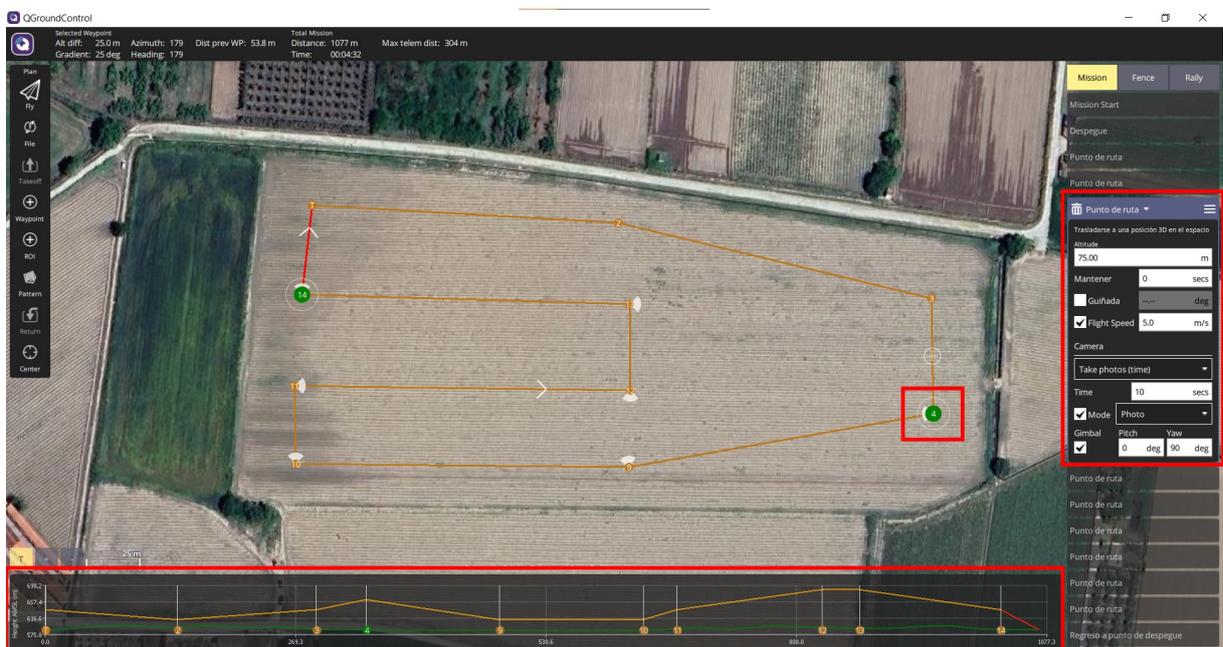


Figura 4.10: Cargar una misión a un vehículo en QGroundControl.
Fuente: elaboración propia

4.4. Problemas detectados y soluciones implementadas

En este apartado se describen los principales problemas y errores identificados durante los procesos de configuración y pilotaje de la aeronave, junto con las soluciones implementadas para resolverlos. El objetivo es proporcionar a los lectores una guía práctica que les permita anticiparse a estos inconvenientes, reduciendo significativamente el tiempo y esfuerzo invertidos en encontrar soluciones a problemas similares.

Durante el proceso de configuración de la aeronave, es común enfrentarse a errores que impiden armarla automáticamente para iniciar el vuelo en modo manual. Estos errores forman parte de las medidas de seguridad integradas en el firmware, cuyo propósito es garantizar que la aeronave no despegue bajo condiciones que puedan comprometer su control o pilotaje. Esta funcionalidad preventiva busca minimizar riesgos operativos y brindar seguridad de vuelo.

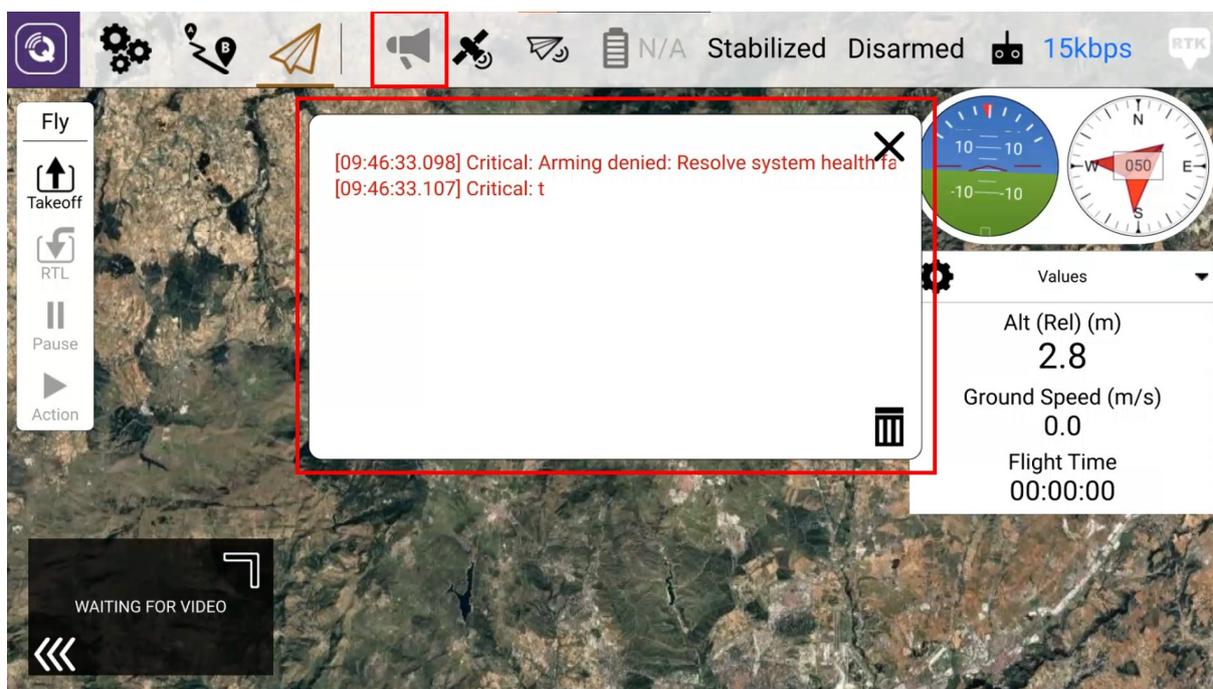


Figura 4.11: Errores detectados en la aeronave.

Fuente: elaboración propia

Algunos de los errores típicos encontrados durante el transcurso de este proyecto han sido los siguientes:

- **Problema:** error “No GPS lock for vehicle”.

Solucion: este error aparece cuando la señal GPS es inexistente y suele aparecer en espacios interiores. La solución es desplazar la aeronave a una zona con señal GPS.

- **Problema:** error “*GPS horizontal pos error too high*”.

Solución: este error se debe a que la señal GPS no es suficientemente precisa y el firmware detecta un error de posición horizontal demasiado elevado para su vuelo seguro. En este caso, se debe colocar la aeronave en una zona con una mejor señal GPS.

- **Problema:** error “*Throttle too high*”.

Solución: cuando se tiene activada la funcionalidad *Full down stick is zero throttle* en el Herelink, puede saltar este error ya que el valor del empuje es demasiado alto para armar la aeronave. La solución es tratar de armar la aeronave mientras se mantiene el *joystick* izquierdo en su posición más baja.

- **Problema:** error “*Crash dumps present on SD*”.

Solución: un *crash dump* es un archivo o registro que contiene información detallada sobre el estado de un sistema o programa en el momento en que ocurrió un fallo crítico. Este registro se genera automáticamente por el firmware o la aplicación para facilitar el diagnóstico y la solución de problemas. Este error suele aparecer cuando la aeronave detecta una caída. Para solucionar este problema se debe insertar la tarjeta SD del controlador de vuelo Cube Orange en el ordenador y eliminar el archivo *crash dump*.

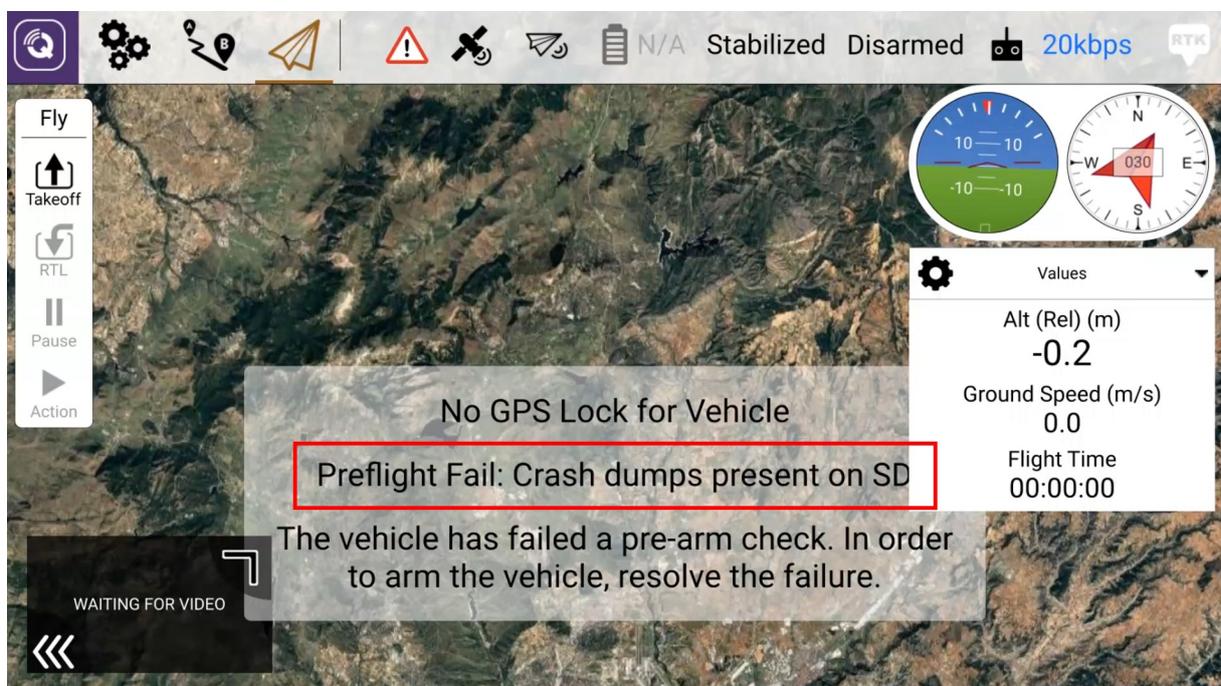


Figura 4.12: Error *crash dump* de la aeronave.
Fuente: elaboración propia

Finalmente, cabe mencionar que debido a la falta de tiempo y recursos y a razones vitales del autor, no ha sido posible realizar las misiones de vuelo autónomo programadas en el marco de este proyecto. Esta limitación técnica y operativa ha impedido cumplir con los objetivos prácticos inicialmente planteados, si bien se han alcanzado avances relevantes en las etapas de planificación y configuración del sistema.

No obstante, el proyecto queda abierto para que futuros investigadores o interesados puedan retomarlo. Los avances logrados hasta el momento, junto con la documentación técnica generada, proporcionan una base sólida para optimizar la aeronave y adecuarla a su uso en misiones de vuelo autónomo. De esta manera, se garantiza la continuidad del trabajo y se maximiza el aprovechamiento del conocimiento y los recursos invertidos en este desarrollo.

Capítulo 5

Análisis y conclusiones

5.1. Conclusiones principales del proyecto

En primer lugar, se destaca la gran utilidad y relevancia de los autopilotos basados en código abierto, como PX4, en la industria de los vehículos aéreos no tripulados. Estos sistemas han demostrado su capacidad para adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones prácticas, ofreciendo flexibilidad y personalización. Cabe señalar que, aunque no cuentan con una documentación técnica extensa, cuentan con el respaldo de una comunidad activa en foros en línea, lo que facilita el intercambio de conocimientos y soluciones. Este equilibrio entre sus ventajas y limitaciones hace que los autopilotos de código abierto sean una opción prometedora para desarrolladores e investigadores.

En segundo lugar, se resalta la importancia de utilizar sensores, componentes y productos de alta calidad para garantizar un rendimiento óptimo del UAV durante el vuelo. Este proyecto ha evidenciado que pequeños ajustes en los parámetros del controlador pueden generar cambios significativos en el comportamiento de vuelo, lo que subraya la necesidad de un enfoque iterativo y detallado durante la configuración. La paciencia y la reiteración en este proceso son fundamentales para alcanzar una configuración ideal que responda a los requisitos específicos de cada misión.

Por último, este proyecto ha representado una oportunidad única para que el autor explore un ámbito técnico hasta ahora inexplorado, proporcionando una experiencia de aprendizaje valiosa y ampliando sus conocimientos en sistemas autónomos. La experiencia adquirida ha despertado un interés profundo por continuar investigando en esta área en el futuro, consolidando las bases para proyectos más avanzados y aplicaciones prácticas de los UAV en distintos sectores.

5.2. Propuestas de mejora y líneas de investigación futuras

Aunque los primeros cuatro objetivos del proyecto se han cumplido con éxito, quedando demostrada la capacidad del sistema UAV para realizar vuelos manuales de manera estable, los dos últimos objetivos relacionados con la planificación y ejecución de misiones de vuelo autónomo no han podido ser completados. Por lo tanto, se propone a futuros investigadores retomar el proyecto y centrarse en estas fases finales, desarrollando misiones simples como un primer paso, y progresando hacia trayectorias más complejas y adaptadas a aplicaciones específicas.

Asimismo, se recomienda realiza pequeños ajustes en los parámetros del sistema de control para optimizar aún más el rendimiento en vuelo estacionario. En este contexto, se sugiere explorar los modos de vuelo “Altitude” y “Position”, que permiten mantener el UAV en el aire sin necesidad de intervención constante por parte del piloto. Estos modos de vuelo se prestan como base para comenzar a planificar y ejecutar misiones autónomas. Se sugiere comenzar a planificar como vuelos simples entre puntos A y B, antes de avanzar hacia patrones más complejos. Finalmente, se plantea la implementación de una calibración automática del controlador PID, lo que podría mejorar significativamente la estabilidad del UAV en los citados modos de vuelo.

En conclusión, este proyecto ha establecido una base sólida para el diseño, integración y validación de un sistema UAV multirroto, demostrando la capacidad del sistema para operar de manera estable en fases iniciales de vuelo. Sin embargo, aún queda un amplio margen para la mejora y exploración. Con las propuestas aquí planteadas, se busca incentivar a futuros investigadores a continuar con el desarrollo de este sistema, permitiendo que alcance su pleno potencial en aplicaciones autónomas más complejas. Este proyecto cierra con la satisfacción de haber aportado un conocimiento significativo al área de los UAV basados en controladores de código abierto, dejando abiertas múltiples vías de investigación que contribuirán a la evolución de estas tecnologías.

Bibliografía

1. **Libro:**

Curso Para Pilotos De RPAS. *Víctor Mateo Martínez, Federico Martín de la Escalera, Soni García Ruiz. 2016.*

2. **Clases docentes:**

Hardware, Aviónica y Ensayo. *Federico Martín de la Escalera. Máster en Ingeniería Aeronáutica, UEM.*

3. **Diapositivas docentes:**

Hardware, Aviónica y Ensayo. *Federico Martín de la Escalera. Máster en Ingeniería Aeronáutica, UEM.*

4. **Artículo de internet:**

Historia de los drones. <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>

5. **Artículo científico:**

Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. *Cristina Cuerno Rejado. 2016.*

6. **Documentación en internet:**

Documentación de PX4. <https://docs.px4.io>

7. **Documentación en internet:**

Documentación de QGroundControl. <https://docs.qgroundcontrol.com>

8. **Documentación en internet:**

Documentación de CubePilot <https://docs.cubepilot.org>

9. **Foro de internet:**

Foro de la comunidad de PX4. <https://discuss.px4.io>

(Esta página ha sido dejada intencionadamente en blanco.)