

ENJAMBRE UAS: DEMOSTRADOR DE VUELO

Análisis de la tecnología y normativa vigente para la operación de enjambres.

Pere Granados Casadó

*Tutor: Federico Martín - Aviónica
Universidad Europea de Madrid
Trabajo Final de Master – Ingeniería Aeronáutica*

12 de enero de 2025

Abstract

El desarrollo y operación de enjambres de drones (*swarming*) representa una de las innovaciones más disruptivas en el ámbito de los sistemas aéreos no tripulados (UAS), con aplicaciones en sectores como la defensa, la logística y el entretenimiento. Este proyecto aborda un análisis integral de la tecnología necesaria para implementar enjambres de drones, considerando los fundamentos teóricos, arquitecturas de comunicación, sistemas de comando y control y los requisitos normativos vigentes en España y por ende, en Europa.

El objetivo principal es diseñar y construir un demostrador de vuelo en enjambre que valide la integración entre los componentes técnicos y regulatorios. Para ello, se selecciona una arquitectura centralizada gestionada por una Ground Control Station (GCS), que coordina la operación de drones mediante enlaces de comunicación Wi-Fi robustos y protocolos estándar.

El trabajo incluye el desarrollo de un sistema prototípico, pruebas de vuelo en entornos controlados, y un análisis normativo detallado para garantizar el cumplimiento de las regulaciones actuales. Los resultados de este proyecto proporcionan una base sólida para futuras implementaciones de enjambres en aplicaciones, destacando las ventajas operativas de resiliencia, precisión y autonomía en este tipo de sistemas.

Índice

1.	Introducción	10
1.1	Estado del arte	11
1.1.1	Aplicaciones en la Industria.....	12
1.1.2	Desafíos Tecnológicos.....	13
1.1.3	Perspectivas Futuras	14
1.2	Objetivo del proyecto	15
1.3	Alcance del Proyecto.....	16
2.	Análisis de la tecnología swarming.....	17
2.1	CONOPS	17
2.2	Requisitos y funcionalidades requeridas para el sistema.....	19
2.2.1	Segmento Aire	19
2.2.2	Segmento Tierra.....	21
2.2.3	Comunicaciones.....	23
2.3	Arquitecturas swarming.....	25
2.3.1	Arquitectura Centralizada	26
2.3.2	Arquitecturas Descentralizadas.....	27
2.3.2.1	Arquitectura UAV Ad Hoc.....	27
2.3.2.2	Arquitectura de Red de UAV Multi-Grupo.....	28
2.3.2.3	Arquitectura de Red Multi-Capa UAV.....	29
2.3.3	Trade-Off entre arquitectura centralizada y descentralizada	31
2.3.4	Sistema de comunicación.....	32
2.3.4.1	Comparativa entre radios convencionales y routers basados en redes IP	32
2.3.5	Control y Gestión del Enjambre	34
2.3.6	Resultado del trade-off.....	35
3.	Demostrador de vuelo	36
3.1	Arquitectura del sistema	37
3.1.1	Segmento Aire	37

3.1.1.1	Dimensionado del UAS.....	38
3.1.1.2	Arquitectura UAS.....	41
3.1.1.2.1	PixHawk 6C.....	42
3.1.1.2.1.1	Skybrush firmware.....	43
3.1.1.2.2	H-RTK F9P GNSS Rover.....	44
3.1.1.2.3	WiFi module DevKit-C ESP32-WROOM-32U.....	45
3.1.1.2.4	SiK Telemetry radio.....	46
3.1.1.2.5	Power Distribution Board.....	47
3.1.1.2.6	Módulo de potencia PM02.....	48
3.1.1.2.7	Frame F330.....	49
3.1.1.2.8	Batería.....	50
3.1.1.2.9	Motores.....	51
3.1.1.2.10	Electronic Speed Controllers (ESCs).....	52
3.1.1.2.11	Propellers 8045 Prop CW CCW.....	53
3.1.1.3	Fabricación y Ensamblaje del UAS.....	54
3.1.2	Segmento Tierra.....	57
3.1.2.1	Componentes.....	57
3.1.2.1.1	Ground Control Station.....	57
3.1.2.1.1.1	Laptop Lenovo Legion.....	58
3.1.2.1.1.1.1	Skybrush Software.....	59
3.1.2.1.1.1.1.1	Skybrush Server.....	59
3.1.2.1.1.1.1.2	Skybrush Live.....	60
3.1.2.1.1.1.1.3	Skybrush Studio.....	61
3.1.2.1.1.1.2	QGroundControl.....	62
3.1.2.1.1.1.3	H-RTK F9P GNSS Base.....	63
3.1.2.1.1.1.4	WiFi Router.....	64
3.1.2.1.1.2	Flight Termination System.....	65
3.1.2.1.1.2.1	Macbook Pro.....	67
3.1.2.1.1.2.1.1	Skybrush Sidekick.....	67

3.1.2.1.1.2.2	SiK Telemetry radio	69
3.1.2.2	Sistema de Comunicaciones	70
3.1.2.2.1	Comunicaciones en la Ground Control Station (GCS).....	70
3.1.2.2.1.1	Mavlink protocol	71
3.1.2.2.1.2	Correcciones RTK.....	72
3.1.2.2.1.3	Telemetría y control	73
3.1.2.2.2	Comunicación del Flight Termination System (FTS).....	73
3.1.2.2.3	Integración del sistema	74
4.	Prueba de vuelo del prototipo.....	75
4.1	Objetivo de la prueba de vuelo	75
4.2	Análisis del ensayo a realizar	75
4.2.1	Medidas de seguridad	75
4.2.2	Preparativos previos al vuelo.....	75
4.2.3	Especificación del test case.....	76
4.3	Resultado de la Prueba	77
5.	Budget	78
6.	Marco normativo y regulatorio	79
6.1	Introducción a la Normativa europea y española	79
6.2	Análisis de las categorías.....	79
6.2.1	Categoría Abierta.....	79
6.2.1.1	Subcategoría A1	79
6.2.1.2	Subcategoría A2	80
6.2.1.3	Subcategoría A3	80
6.2.2	Categoría específica.....	80
6.2.2.1	Autorización Operacional para operaciones tipo SORA.....	82
6.2.2.2	Documentación a presentar	83
6.2.2.2.1	Manual de Operaciones (OM)	84
6.2.2.2.2	Manual de mantenimiento.....	84
6.2.2.2.3	Análisis de viabilidad.....	84

6.2.2.2.4	CONOPS.....	85
6.2.2.2.5	Especificación técnica de la aeronave.....	85
6.2.2.2.6	Seguro de Responsabilidad Civil.....	86
6.2.2.2.7	Formación del operador.....	86
6.2.2.3	Formalización de la solicitud.....	86
7.	Conclusiones.....	88
9.	ANEXO: Proceso de configuración de los distintos componentes hardware.....	90
9.1	Configuración del router ASUS RT AX35U.....	90
9.2	Configuración de la Placa WiFi ESP32-DevKitC-V4.....	92
9.3	Prueba de comunicación entre ESP32 y Pixhawk.....	96
9.4	Configuración de la ESP32 en Modo Cliente.....	99
9.5	Asignación de IPs a las ESP32.....	101
9.6	Configuración de la comunicación Pixhawk UART - WiFi / UDP a la GCS.....	102
9.6.1	Solución de problemas:.....	104
9.7	Flasheo del Firmware Skybrush para Pixhawk 6c.....	104
9.8	Configuración de Parámetros en la Pixhawk 6C.....	107
9.8.1	Parámetros para Correcciones RTK.....	109
9.8.2	Parámetros para Optimizar la Maniobrabilidad del Dron.....	109
10.	Referencias.....	110

Figuras

Figura 1 Representación de un enjambre en una ciudad.....	10
Figura 2 Enjambre de UAS aplicación en espectáculo de luces	13
Figura 3 FCAS: Future Combat Air System CONOPS	14
Figura 4 Triángulo que cierra el loop entre desarrollo tecnológico, demostrador de vuelo y normativa	15
Figura 5 Concepto de operaciones de vuelo en enjambre.....	18
Figura 6 Predator RPA	25
Figura 7 CONOPS arquitectura centralizada	27
Figura 8 CONOPS arquitectura descentralizada UAV AdHoc	28
Figura 9 CONOPS arquitectura descentralizada multiples UAV	29
Figura 10 CONOPS arquitectura descentralizada multicapa UAV	30
Figura 11 Receptores de radio de UAS. Demostración gráfica del motivo por el que es inviable esta solución.....	33
Figura 12 Enlace mediante Wi-Fi. Demostración visual del motivo por el que esta solución es viable.....	33
Figura 13 Dragón formado por un enjambre de luces	36
Figura 14 CONOPS del proof of concept	37
Figura 15 Dimensionado UAS en eCalc	38
Figura 16 Arquitectura y conexionado demostrador de vuelo UAS	41
Figura 17 Pixhawk 6C	42
Figura 18 H-RTK F9P	44
Figura 19 ESP-32 WiFi module.....	45
Figura 20 SiK radio.....	46
Figura 21 PDB	47
Figura 22 PM02	48
Figura 23 F330 Frame.....	49
Figura 24 Batería.....	50
Figura 25 Motores.....	51
Figura 26 ESCs	52
Figura 27 Propellers.....	53
Figura 28 Ensamblaje CAD	54
Figura 29 Impresión 3D con incrustación de tuercas en estructura	54
Figura 30 Protoboard test del conexionado ESP32.....	55
Figura 31 Ensamblaje de piezas impresas en el UAS.....	56
Figura 32 Prototipos impresos	56

Figura 33 GUI skybrush live.....	60
Figura 34 Skybrush studio	61
Figura 35 GUI QGroundControl.....	62
Figura 36 F9P RTK GNSS Base.....	63
Figura 37 Soporte imprimido en 3D para la base	63
Figura 38 ASUS RT-AX53U router	64
Figura 39 GUI Sidekick	68
Figura 40 Sik Radio	69
Figura 41 UAS Ensamblado	74
Figura 42 Despegue, vuelo y aterrizaje.....	77
Figura 43 PDRAs vigentes y futuras en evaluación	81
Figura 44 Guía AESA para la solicitud de la autorización	83
Figura 45 Nivel de complejidad asociado al análisis de riesgo y documentación a presentar para obtener la autorización operacional	87

Tablas

Tabla 1 Requisitos del segmento aire	19
Tabla 2 Requisitos del segmento tierra.....	21
Tabla 3 Requisitos de las comunicaciones.....	23
Tabla 4 Desembolso segmento aire	78
Tabla 5 Desembolso segmento tierra.....	78
Tabla 6 Desembolso de otros gastos.....	78

Acrónimos

UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
GCS	Ground Control Station
IA	Inteligencia Artificial
LSTM	Long Short Term Memory
SORA	Specific Operations Risk Assessment
PDRA	Predefined Risk Assessment
STS	Standard Scenario
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
RPA	Remotely Piloted Aircraft
Wi-Fi	Wireless Fidelity
GCS	Ground Control Station
GNSS	Global Navigation Satellite System
RTK	Real-Time Kinematics
LIDAR	Light Detection and Ranging
IMU	Inertial Measurement Unit
VLOS	Visual Line of Sight
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
FANET	Flying Ad Hoc Network
MAVLink	Micro Air Vehicle Link (Communication Protocol)
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea (España)
EASA	European Union Aviation Safety Agency

1. Introducción

Los Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS, por sus siglas en inglés) han transformado numerosas industrias en los últimos años, demostrando su versatilidad y eficiencia en aplicaciones que abarcan desde el sector agrícola hasta la defensa. En la agricultura, los drones han optimizado tareas como la fumigación y el monitoreo de cultivos, mientras que en operaciones de búsqueda y rescate han permitido salvar vidas gracias a su capacidad para acceder a áreas inaccesibles de forma rápida y segura. En el ámbito de la defensa, los UAS se han consolidado como herramientas clave para misiones de vigilancia, inteligencia y reconocimiento, e incluso para operaciones ofensivas. Estas capacidades han llevado a niveles de eficiencia, precisión y reducción de costes que antes requerían un alto grado de recursos humanos y financieros.



Figura 1 Representación de un enjambre en una ciudad

Conforme avanza la tecnología de UAS, también lo hacen las modalidades de vuelo, evolucionando hacia operaciones más complejas y cooperativas. Entre estas, destacan las operaciones de enjambre, conocidas como *swarming*, donde múltiples drones actúan de manera coordinada para alcanzar un objetivo común. Inspirado en los patrones de comportamiento natural observados en bandadas de aves o cardúmenes de peces, el *swarming* permite que los drones interactúen entre sí, compartan información en tiempo real y ajusten su comportamiento de forma autónoma ante cambios en su entorno o en la misión. De esta manera, un enjambre de drones puede realizar tareas colaborativas con una mínima intervención humana, aumentando significativamente la eficiencia y resiliencia del sistema.

La capacidad de los enjambres para operar como una unidad cohesiva ha abierto nuevas posibilidades en múltiples sectores. En defensa y seguridad, los enjambres ofrecen ventajas estratégicas como resiliencia frente a fallos: la pérdida de uno o varios drones no compromete la misión completa. Además, pueden realizar tareas como reconocimiento, vigilancia y ataque de manera coordinada. En el ámbito civil, estas tecnologías tienen un potencial extraordinario en áreas como la logística, la agricultura de precisión y la gestión de desastres, permitiendo cubrir grandes áreas, recopilar datos en tiempo real y ejecutar tareas distribuidas de forma eficiente.

Invertir en el desarrollo de tecnologías de *swarming* es esencial debido a las ventajas estratégicas y operativas que ofrecen. En un mundo cada vez más dinámico y demandante, los enjambres de drones representan una solución robusta y adaptable para abordar retos complejos. La investigación y optimización de estos sistemas prometen no solo mejorar la eficacia operativa y reducir costes, sino también incrementar la seguridad en un amplio rango de aplicaciones. Su capacidad para tomar decisiones rápidas y autónomas en entornos cambiantes los posiciona como una de las tecnologías más prometedoras para el futuro de los UAS.

1.1 Estado del arte

El campo de los enjambres de drones ha experimentado un notable progreso en los últimos años, gracias a la convergencia de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA), los sistemas autónomos y las redes de comunicación de alta eficiencia. Estos avances han permitido la evolución de los enjambres de drones desde experimentos conceptuales hacia aplicaciones prácticas en sectores estratégicos, transformando la forma en que se abordan tareas complejas.

Uno de los pilares del *swarming* es la capacidad de los drones para interactuar y coordinarse de manera autónoma, lo que requiere algoritmos avanzados de inteligencia colectiva. Métodos como los basados en redes neuronales recurrentes (RNN) y aprendizaje por refuerzo profundo permiten que los UAV adapten su comportamiento en tiempo real ante cambios en el entorno o en la misión. Por ejemplo, modelos como las redes *Long Short-Term Memory* (LSTM) se han utilizado para optimizar trayectorias en escenarios dinámicos, mientras que los algoritmos de optimización basados en comportamiento de enjambres han mejorado la formación y dispersión de los drones.

Además, se han desarrollado técnicas de control distribuido, como los modelos líder-seguidor, que facilitan la cohesión y adaptabilidad del enjambre. Estos modelos permiten que los drones mantengan formaciones estables, eviten colisiones y distribuyan eficientemente las tareas en entornos complejos.

Un factor crucial para el éxito del swarming es la comunicación entre los UAV y con la estación de control terrestre (GCS). Protocolos como MAVLink y redes basadas en Flying Ad Hoc Networks (FANETs) han permitido mejorar la fiabilidad y escalabilidad de las comunicaciones. La adopción de redes de malla (mesh networks) ha sido especialmente útil en escenarios donde los drones necesitan mantener comunicación constante entre sí para adaptarse a cambios en el entorno. El uso de tecnologías emergentes como 5G y Wi-Fi 6 promete ampliar las capacidades de comunicación de los enjambres, facilitando la transmisión de grandes volúmenes de datos en tiempo real y mejorando la latencia en operaciones críticas.

A pesar de los avances, el swarming enfrenta varios desafíos técnicos. Entre ellos, la gestión de la energía es un factor limitante, ya que la duración de las baterías restringe la autonomía operativa de los drones. Los esfuerzos en la optimización de rutas y el desarrollo de baterías de alta densidad energética están ayudando a abordar este problema. Otro desafío clave es la seguridad y la ciberresiliencia de los enjambres. Garantizar que los drones puedan operar en entornos con interferencias electromagnéticas o intentos de sabotaje es esencial, especialmente en aplicaciones de defensa. Adicionalmente, la regulación del espacio aéreo plantea barreras, ya que las legislaciones actuales aún no están completamente adaptadas para la operación segura y legal de enjambres a gran escala.

El futuro del *swarming* en drones promete una integración más estrecha con tecnologías como la inteligencia artificial distribuida, sensores avanzados y plataformas de computación en la nube. Se espera que los enjambres sean cada vez más autónomos, escalables y aplicables a una variedad de contextos, desde operaciones urbanas hasta exploración de entornos inhóspitos. Los esfuerzos en normativas y estándares internacionales serán cruciales para garantizar su adopción segura y eficiente.

1.1.1 Aplicaciones en la Industria

Los enjambres de drones se están implementando en una variedad de sectores:

- **Defensa:** Los enjambres son utilizados en misiones de reconocimiento, vigilancia y, en algunos casos, como unidades ofensivas en el campo de batalla. Estas operaciones se benefician de la resiliencia del enjambre, donde la pérdida de algunos drones no compromete la misión.
- **Búsqueda y Rescate:** Gracias a su capacidad para cubrir grandes áreas rápidamente, los enjambres de drones son ideales para misiones de búsqueda y rescate. Proporcionan datos en tiempo real que permiten a los equipos de rescate tomar decisiones rápidas y efectivas

- **Monitoreo Ambiental:** En el ámbito medioambiental, los enjambres se utilizan para tareas como la reforestación mediante la plantación de semillas y el monitoreo de la salud de los cultivos.
- **Entretenimiento:** En la industria del entretenimiento, los enjambres de drones se emplean en espectáculos de luces sincronizadas, destacando la precisión y fiabilidad de esta tecnología.



Figura 2 Enjambre de UAS aplicación en espectáculo de luces

1.1.2 Desafíos Tecnológicos

A pesar de su potencial, los enjambres de drones enfrentan varios desafíos tecnológicos:

- **Comunicación:** Mantener una comunicación fiable entre los drones es un reto, especialmente en ambientes con interferencias. Los avances en protocolos de redes de malla, como el estándar IEEE 802.11s, han mejorado la comunicación multi-salto, lo que permite a los drones extender su alcance operativo.
- **Gestión de Energía:** La limitación de la duración de la batería es otro desafío importante. Las innovaciones en tecnología de baterías y controladores de vuelo eficientes están ayudando a mitigar este problema.
- **Regulaciones y Seguridad:** A medida que el uso de enjambres se expande, también lo hacen las preocupaciones por parte de las autoridades y por ende, la normativa evoluciona. Es crucial asegurar que las operaciones cumplan con las leyes en constante evolución sobre el uso del espacio aéreo, la privacidad y la prevención de colisiones.

1.1.3 Perspectivas Futuras

La integración de esta tecnología en la sociedad plantea numerosos desafíos, no solo en el ámbito tecnológico, sino también en la formulación y adaptación de marcos regulatorios adecuados. El futuro de los enjambres de drones parece prometedor, con investigaciones enfocadas en mejorar la autonomía, los algoritmos de coordinación, y la ampliación de sus aplicaciones. Las tecnologías emergentes, como los sistemas de evasión de colisiones impulsados por IA y los sistemas de análisis de datos en tiempo real, están impulsando el desarrollo de esta tecnología.

Uno de los ejemplos más claros en la industria aeroespacial de defensa es el proyecto europeo **Future Combat Air System FCAS** incorpora el concepto de **swarming** como una de sus capacidades clave para revolucionar el combate aéreo. Esta tecnología permite coordinar y desplegar múltiples drones, conocidos como **Remote Carriers**, que trabajan en conjunto para realizar misiones de manera autónoma y cooperativa. Los enjambres de drones en el FCAS están diseñados para saturar defensas enemigas, ejecutar ataques precisos, realizar tareas de reconocimiento y adaptarse dinámicamente a las amenazas del entorno. Su funcionamiento está respaldado por algoritmos avanzados de inteligencia artificial y redes de comunicación seguras, lo que les permite operar en tiempo real con resiliencia y eficacia. El *swarming* ofrece ventajas estratégicas como la reducción de riesgos para plataformas tripuladas, mayor eficiencia operativa y superioridad en espacios aéreos disputados, convirtiéndose en un pilar fundamental del ecosistema FCAS.



Figura 3 FCAS: Future Combat Air System CONOPS

1.2 Objetivo del proyecto

El objetivo principal de este trabajo es adquirir un conocimiento profundo de los UAS con un enfoque particular en la modalidad de vuelo en enjambre (*swarming*), incluyendo los principios teóricos, algoritmos y distintos sistemas que permiten la coordinación de múltiples drones en operaciones complejas. Además, se busca analizar la normativa vigente necesaria para la operación legal y segura de vuelos en enjambre, tanto a nivel nacional como europeo.

Para cerrar el ciclo completo, el proyecto incluye la fabricación de un demostrador que valide la integración entre las capacidades técnicas y los requisitos regulatorios, estableciendo así una base sólida para el desarrollo y la operación de drones diseñados específicamente para aplicaciones de *swarming* conforme a la legislación actual.



Figura 4 Triángulo que cierra el loop entre desarrollo tecnológico, demostrador de vuelo y normativa

Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Comprender la tecnología de *swarming* en UAS:** Realizar un estudio exhaustivo de los fundamentos teóricos y tecnológicos que sustentan la operación de enjambres de drones, incluyendo algoritmos de coordinación, comunicación y control autónomo.
- **Desarrollar un demostrador de vuelo en enjambre:** Diseñar y construir un *proof of concept* que valide la viabilidad de un sistema de vuelo en enjambre, integrando tanto hardware como software.
- **Analizar los procedimientos y requisitos legales para la operación de enjambres en España:** Examinar en profundidad la normativa vigente a nivel europeo y nacional aplicable a las operaciones de UAS, con especial énfasis en los aspectos regulatorios relacionados con el uso de enjambres, garantizando su cumplimiento en el desarrollo del proyecto.

1.3 Alcance del Proyecto

El alcance de este proyecto se estructura en función de los objetivos planteados y se detalla en los siguientes puntos clave:

Análisis de la tecnología *swarming*

- **Aplicación de la ingeniería de sistemas:** Presentación del CONOPS, descripción de los requisitos, funcionalidades necesarias. Especial énfasis en:
 - **Análisis de Arquitecturas de Swarming:** Realizar una descripción de los diferentes tipos de arquitecturas utilizadas en enjambres de drones, incluyendo modelos centralizados, descentralizados y mixtos.
 - **Segmentos Tierra y Aire:** Describir en detalle los componentes del segmento tierra y segmento aire, analizando su funcionalidad y su integración dentro del sistema global.
 - **Sistemas de Comunicación:** Examinar y describir los sistemas de comunicación que conectan los drones con la estación terrestre, enfatizando su fiabilidad, escalabilidad y capacidad de gestión de datos.

Demostrador de vuelo

- **Arquitectura y construcción del sistema:** Descripción de la arquitectura del sistema y fabricación de un demostrador de vuelo compuesto por un UAS y una Ground Control Station (GCS), integrando hardware y software necesarios para las operaciones de enjambre para espectáculos de luces.
- **Prueba de validación:** Llevar a cabo un vuelo de prueba en condiciones controladas, con el objetivo de validar las capacidades básicas de coordinación y operación autónoma del enjambre.

Marco normativo y regulatorio

- **Normativa Europea y Española:** Introducir la legislación vigente aplicable a las operaciones de UAS, con énfasis en los aspectos específicos que afectan al uso de enjambres.
- **Categorías operacionales de UAS:** Detallar las características y diferencias entre las distintas categorías operativas, destacando sus implicaciones legales y operativas.
- **Requisitos de AESA para operar enjambres:** Analizar los procedimientos requeridos para la obtención de autorizaciones operacionales necesarias para enjambres de drones.

2. Análisis de la tecnología swarming

A continuación, se presenta una descripción del concepto de *swarming*, analizando sus fundamentos, los componentes clave que intervienen en su implementación y las diferentes arquitecturas existentes. En primer lugar, se revisarán los segmentos tierra y aire, así como los protocolos de comunicación empleados para garantizar una operación eficiente y segura del enjambre. Este análisis establecerá la base técnica necesaria para comprender el desarrollo posterior del demostrador de vuelo que constituye el núcleo de este proyecto.

2.1 CONOPS

En la operación de un enjambre de drones, la coordinación entre múltiples UAVs es esencial para garantizar el éxito de misiones complejas, que abarcan desde operaciones de búsqueda y rescate, misiones ISR hasta espectáculos aéreos. Estos sistemas están diseñados para trabajar en equipo, ejecutando tareas que serían difíciles o imposibles de lograr con un solo dron.

El *Concept of Operations* de un enjambre de drones que se expone a continuación, establece los elementos esenciales necesarios para operar con éxito múltiples UAVs de manera coordinada. Los tres pilares fundamentales de esta operación son la estación de tierra, el segmento aire y las comunicaciones, que trabajan de manera conjunta para cumplir con los objetivos de la misión.

1. **Segmento tierra, GCS:** La estación de tierra es el centro de mando desde el cual el operador planifica, supervisa y controla la misión del enjambre. En la GCS se diseñan las rutas, se asignan las tareas a los drones y se monitorea su estado en tiempo real. Además, el operador puede ajustar la misión en función de las necesidades o cambios en el entorno. La GCS proporciona una visión global del enjambre, permitiendo tomar decisiones estratégicas y gestionar de forma efectiva las operaciones.
2. **Segmento aire:** Este segmento incluye los drones que forman el enjambre. Cada UAV está equipado con sistemas de navegación y control que les permiten actuar de forma autónoma o semiautónoma, adaptándose dinámicamente a los comandos de la GCS o a las condiciones del entorno. Los drones trabajan de manera colaborativa para cumplir los objetivos de la misión, compartiendo tareas como vigilancia, transporte, reconocimiento o ataque. La coordinación entre los drones es clave para garantizar su eficacia y evitar colisiones o interrupciones durante la operación.
3. **Comunicaciones:** El enlace de comunicaciones es el componente que conecta la estación de tierra con el segmento aire. Es fundamental para la transmisión de datos, como la telemetría, los comandos de control y la información sensorial. Las comunicaciones permiten que los drones mantengan la sincronización entre ellos y con la GCS,

asegurando una operación fluida y coordinada. Este sistema de enlace debe ser fiable, con baja latencia y resiliente ante posibles interferencias, para garantizar que el operador mantenga el control en todo momento.

En conjunto, estos tres elementos forman la base operativa del enjambre de drones. La estación de tierra proporciona el control estratégico, el segmento aire ejecuta las tareas asignadas y las comunicaciones garantizan la conexión y coordinación necesarias para que el sistema funcione como una unidad cohesiva. Este enfoque asegura una operación eficiente, adaptable y segura en diferentes escenarios de misión.

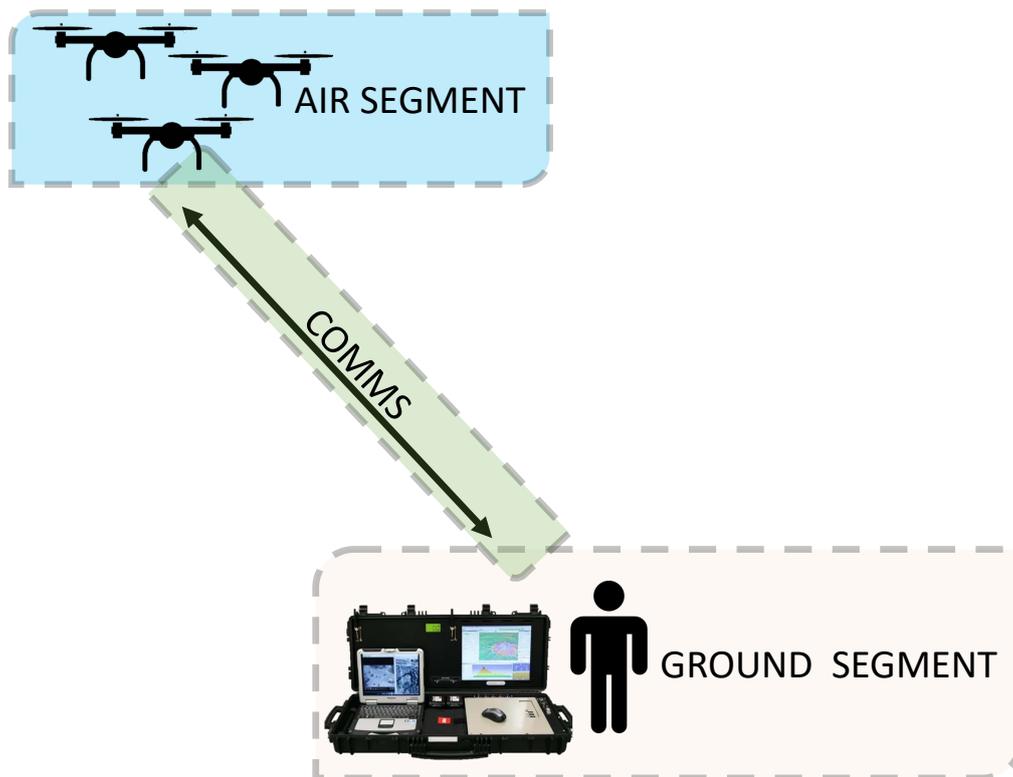


Figura 5 Concepto de operaciones de vuelo en enjambre.

A partir del CONOPS, se pueden deducir los requisitos fundamentales de alto nivel que definirán las funcionalidades necesarias del sistema.

Estos requisitos proporcionarán la base para el diseño e integración del sistema, asegurando que los drones puedan interactuar entre sí y con la estación de tierra de manera coordinada y eficiente, estableciendo las bases para la correcta ejecución de las misiones.

En la siguiente sección, se describen detalladamente los requisitos técnicos y operativos de los distintos segmentos que conforman el sistema: el segmento aire, el segmento tierra y las comunicaciones.

2.2 Requisitos y funcionalidades requeridas para el sistema

2.2.1 Segmento Aire

Requisitos

Tabla 1 Requisitos del segmento aire

ID	Requisito
AS-01	Los drones deben estar equipados con receptores GNSS compatibles con tecnología RTK para garantizar la precisión de posición en el rango de centímetros.
AS-02	Cada dron debe contar con un sistema de terminación de vuelo redundante para finalizar el vuelo de manera segura
AS-03	Los drones deben tener sistemas de navegación autónoma integrados
AS-04	Los drones deben ser controlables desde la GCS de manera individual y colectiva
AS-05	Los drones deben volar un mínimo de 10 minutos
AS-06	Los drones deben incorporar sensores IMU, viento y temperatura para ajustar automáticamente el comportamiento de vuelo según las condiciones ambientales.
AS-07	Los drones deben ser capaces de regresar automáticamente a un punto de origen predeterminado en caso de pérdida de comunicación con la GCS.
AS-08	Los drones deben dimensionarse para minimizar el consumo energético y optimice la eficiencia en vuelo.
AS-09	Los drones deben ser capaces de realizar vuelos automáticos en entornos controlados.
AS-10	Los drones deben reportar el estado de la batería en tiempo real
AS-11	Los drones deben alertar al operador sobre niveles bajos de energía.
AS-12	Los drones deben reportar posición, altura y velocidad a la estación de tierra
AS-13	Los drones deben realizar un aterrizaje de emergencia o un return to home si se salen del volumen operacional
AS-14	Los drones deben ser resistentes a condiciones climáticas adversas como lluvia ligera o viento moderado.

Descripción de los requisitos y funcionalidades

El segmento aire de un sistema de enjambre de drones debe contar con funcionalidades que aseguren **precisión**, **autonomía** y **seguridad** en todas las operaciones. Para garantizar la **precisión posicional**, los drones deben incorporar receptores GNSS compatibles con tecnología **RTK**, permitiendo alcanzar un posicionamiento en el rango de centímetros. Esta capacidad es esencial para **maniobras coordinadas** y aplicaciones que exigen alta exactitud, como **inspecciones técnicas** o **vuelos sincronizados**.

La **seguridad operativa** es otro aspecto fundamental. Cada dron debe incluir un sistema de **terminación de vuelo redundante** que permita finalizar su operación de manera segura en caso de **emergencias** o **fallos críticos**. Además, deben ser capaces de **retornar automáticamente** a un punto de origen predeterminado si pierden comunicación con la estación de control, y realizar un **aterrizaje de emergencia** o retorno seguro si exceden los límites del **volumen operacional**

(espacio aéreo definido que limita el vuelo del dron en su interior). Estas funcionalidades aseguran que el sistema mantenga altos estándares de **fiabilidad** y minimice riesgos.

Los drones también deben ser altamente **autónomos**, integrando sistemas de **navegación avanzados** que les permitan operar sin intervención constante del operador. Estas capacidades deben complementarse con sensores de **aceleración, viento y temperatura**, que les permitan adaptarse dinámicamente a las condiciones de **vuelto y climáticas**, manteniendo la estabilidad y el rendimiento incluso en escenarios adversos como **lluvia ligera o viento moderado**. La capacidad de realizar **vuelos automáticos** en entornos controlados refuerza aún más su **autonomía**, facilitando la ejecución de **misiones preprogramadas**.

La **eficiencia energética** es otra funcionalidad clave. Los drones deben estar diseñados para **minimizar el consumo energético** y garantizar un tiempo de vuelo mínimo de **10 minutos**, optimizando así su rendimiento operativo. Además, deben incluir sistemas que permitan el **monitoreo constante** de su estado energético, reportando en tiempo real el nivel de **batería**, junto con otros **parámetros críticos** como posición, altura y velocidad. Para garantizar una respuesta proactiva, deben **alertar al operador** en caso de niveles bajos de energía, lo que permite planificar acciones correctivas antes de comprometer la operación.

Por último, los drones deben estar diseñados para ser controlados de forma **flexible**, tanto **individual** como **colectivamente**, desde una estación de control en tierra. Esta capacidad es esencial para operaciones **complejas** donde múltiples UAV deben **coordinarse** para cumplir objetivos específicos. En conjunto, estas funcionalidades aseguran que el **segmento aire** no solo cumpla con los **requisitos técnicos**, sino que también ofrezca un sistema **robusto, confiable y adaptable** a diversas aplicaciones.

2.2.2 Segmento Tierra

Requisitos

Tabla 2 Requisitos del segmento tierra

ID	Requisito
GS-01	La GCS debe gestionar y controlar múltiples drones simultáneamente, permitiendo planificación, supervisión y reconfiguración de misiones en tiempo real.
GS-02	La GCS debe mostrar datos de posición, estado de batería y parámetros críticos de cada dron en tiempo real.
GS-03	La GCS debe ofrecer herramientas de planificación y simulación de misiones para configurar trayectorias y maniobras antes del vuelo.
GS-04	La GCS debe disponer de una interfaz gráfica intuitiva para monitorear el estado del enjambre, alertas en tiempo real y emitir comandos de emergencia.
GS-05	La GCS debe permitir alternar entre control manual de drones individuales y control autónomo del enjambre según los requisitos de la misión.
GS-06	La estación de tierra debe integrar un FTS para garantizar conectividad redundante.
GS-07	La GCS debe registrar telemetría y eventos críticos de misión para su posterior análisis.
GS-08	La GCS debe proveer acceso seguro mediante autenticación de usuarios y cifrado de comunicaciones.
GS-09	La GCS debe incluir una función de simulación de vuelo en tiempo real para realizar pruebas previas al despliegue.
GS-10	La GCS debe contar con sistemas de respaldo de energía para garantizar la operación continua en caso de fallos eléctricos.
GS-11	La GCS debe emitir notificaciones y alertas automatizadas ante eventos críticos como pérdida de enlace o bajo nivel de batería.
GS-12	La GCS debe mostrar mapas en tiempo real con la ubicación y trayectoria de cada UAV en el enjambre.
GS-13	La GCS debe permitir al usuario definir un volumen de control de seguridad para impedir que no se puedan salir los drones
GS-14	La GCS debe estar diseñada para operar en condiciones climáticas adversas, incluyendo protección contra polvo y humedad.

Descripción de los requisitos y funcionalidades

El segmento tierra, debe proporcionar un sistema de gestión **centralizado** y **robusto** que garantice la operación **eficiente** y **segura** de un enjambre de drones. Una funcionalidad clave es la capacidad de **controlar simultáneamente múltiples UAVs**, permitiendo **planificar misiones, supervisarlas en tiempo real** y **reconfigurarlas** según las necesidades operativas. Para asegurar un control completo, la GCS debe ofrecer una **visualización detallada** de datos críticos como **posición, estado de batería** y otros parámetros esenciales, facilitando al operador una **toma de decisiones informada** y rápida.

La GCS debe contar con herramientas avanzadas para la **planificación** y **simulación de misiones**, lo que permite configurar **trayectorias** y **maniobras** con precisión antes del despliegue. Esta funcionalidad se complementa con **simulaciones en tiempo real** que permiten prever conflictos o ajustes necesarios antes de ejecutar las operaciones. La **interfaz** debe ser **gráfica** e **intuitiva**,

diseñada para facilitar el **monitoreo** del estado del enjambre y permitir la **gestión de alertas** y la emisión de **comandos de emergencia**. Además, la GCS debe ofrecer la flexibilidad de alternar entre el **control manual** de drones individuales y el **control autónomo del enjambre**, adaptándose a los requisitos dinámicos de cada misión. Además, debe ser capaz de emitir **notificaciones** y **alertas automatizadas** ante eventos críticos, como **pérdida de enlace** o **niveles bajos de batería**, permitiendo al operador reaccionar rápidamente para mitigar riesgos.

Un aspecto esencial en la **resiliencia operativa** del segmento tierra es la integración de un **Flight Termination System (FTS)**. Este sistema, requerido por la autoridad competente, en nuestro país AESA, proporciona una capa adicional de **seguridad** y **redundancia**, garantizando que la **conectividad** entre la GCS y los drones se mantenga estable incluso en escenarios críticos. El FTS también actúa como un sistema de respaldo para **finalizar vuelos de manera segura** en caso de emergencias que comprometan el control del enjambre.

La GCS también debe integrar capacidades de **supervisión avanzada**, como la **visualización en tiempo real** de mapas que muestren la **ubicación** y **trayectoria** de cada dron en el enjambre. Esta funcionalidad no solo facilita el **monitoreo operativo**, sino que también permite establecer un **volumen de control de seguridad**, evitando que los drones salgan de los **límites definidos** y reduciendo los riesgos asociados a operaciones fuera de las zonas autorizadas.

Por último, es importante recalcar que la GCS debe **registrar** todos los datos relevantes de las misiones, incluyendo **telemetría** y **eventos críticos**, para permitir un **análisis exhaustivo posterior** que facilite la **mejora continua** del sistema. En conjunto, estas funcionalidades, junto con el FTS, convierten a la GCS en el núcleo de **gestión** del enjambre, asegurando un **control total, seguridad operativa** y **adaptabilidad** en cualquier escenario de misión.

2.2.3 Comunicaciones

Requisitos

Tabla 3 Requisitos de las comunicaciones

ID	Requisito
CS-01	Implementar un protocolo de comunicaciones robusto y escalable para la transferencia eficiente de datos entre la GCS y los drones.
CS-02	Asegurar baja latencia en el enlace de comunicación para garantizar respuesta en tiempo real en escenarios críticos.
CS-03	Integrar sistemas de validación de enlace para verificar la estabilidad de las comunicaciones antes y durante la misión.
CS-04	Permitir el escalado del sistema para soportar un mayor número de drones sin comprometer la calidad de la comunicación.
CS-05	Implementar redundancia en enlaces de comunicación para asegurar continuidad operativa ante fallos de un canal.
CS-06	Permitir el monitoreo continuo de la calidad del enlace de comunicación para tomar decisiones en tiempo real.
CS-07	Garantizar la interoperabilidad con diferentes plataformas UAV y GCS mediante estándares abiertos.
CS-08	Utilizar frecuencias aprobadas y reguladas para evitar conflictos con otros sistemas.
CS-09	Garantizar que los datos críticos sean retransmitidos automáticamente en caso de pérdida de paquetes.

Descripción de los requisitos y funcionalidades

El sistema de comunicaciones constituye un componente esencial para garantizar la **transmisión eficiente, segura y escalable** de datos entre la **Ground Control Station (GCS)** y los drones que conforman el enjambre. Una de las funcionalidades más importantes es la implementación de un **protocolo de comunicaciones robusto y escalable**, diseñado para manejar el flujo de datos de manera eficiente incluso en escenarios operativos complejos. Este protocolo debe permitir la transferencia fluida de **telemetría, comandos y datos sensoriales**, asegurando la sincronización entre los drones y la GCS.

Para garantizar una **respuesta en tiempo real**, el sistema debe operar con **baja latencia**, una funcionalidad crítica en escenarios dinámicos donde las decisiones rápidas son esenciales para el éxito de la misión. Además, debe incluir sistemas de **validación de enlace** que permitan verificar la estabilidad de las comunicaciones antes y durante la operación, asegurando que no haya interrupciones que comprometan el flujo de información entre los segmentos.

La capacidad de **escalado del sistema** es otra funcionalidad clave, permitiendo integrar un mayor número de drones en el enjambre sin comprometer la **calidad de las comunicaciones**. Esto asegura que el sistema pueda adaptarse a misiones más complejas y con mayor volumen de datos. Para aumentar la **resiliencia operativa**, el sistema debe implementar **enlaces redundantes** que

aseguren la continuidad de la comunicación incluso en caso de fallos en uno de los canales, minimizando interrupciones críticas.

El sistema de comunicaciones debe incluir la funcionalidad de **monitoreo continuo** de la calidad del enlace, permitiendo a los operadores tomar decisiones en tiempo real basadas en métricas como la intensidad de la señal y la tasa de pérdida de paquetes. Esto es fundamental para mantener la integridad de las operaciones en entornos con interferencias o condiciones cambiantes.

La **interoperabilidad** es una característica esencial, ya que el sistema debe ser compatible con diferentes plataformas UAV y GCS mediante el uso de **estándares abiertos**. Esto facilita la integración de nuevos dispositivos y asegura que el sistema pueda adaptarse a tecnologías emergentes. Además, todas las comunicaciones deben operar en **frecuencias aprobadas y reguladas**, evitando conflictos con otros sistemas y cumpliendo con los requisitos legales y técnicos establecidos.

En escenarios donde se producen pérdidas de datos, el sistema debe garantizar la **retransmisión automática de datos críticos**, asegurando que la información esencial llegue a su destino sin retrasos innecesarios. Esta funcionalidad refuerza la **fiabilidad** del sistema y es crucial en misiones donde cada segundo cuenta.

En conjunto, estas funcionalidades aseguran que el sistema de comunicaciones proporcione un enlace confiable, eficiente y adaptable, permitiendo una operación fluida del enjambre de drones incluso en entornos complejos y exigentes. La integración de protocolos avanzados, monitoreo en tiempo real y redundancia garantiza la **seguridad operativa**, mientras que la escalabilidad y la interoperabilidad aseguran la **adaptabilidad** del sistema frente a futuros desafíos tecnológicos.

A partir del concepto general de operación de un enjambre de drones, los requisitos y las funcionalidades que debe poseer el sistema, es momento de empezar a definir la solución y el diseño del sistema. Para ello, se analizarán en primer lugar, las arquitecturas que permiten su implementación práctica. En la siguiente sección, se evaluarán los distintos tipos de arquitectura de *swarming* que existen.

La elección de una arquitectura adecuada es clave para garantizar la eficiencia, resiliencia y escalabilidad del sistema en escenarios operativos complejos. Estas definirán cómo los drones interactúan entre sí y con la estación de tierra, estableciendo las bases para la coordinación, toma de decisiones y ejecución de las misiones.

2.3 Arquitecturas swarming

El *swarming* en drones se basa en arquitecturas de comunicación avanzadas que garantizan una coordinación eficiente entre los vehículos aéreos no tripulados (UAV). Estas arquitecturas determinan cómo los drones se comunican entre sí y con la estación de control, y pueden clasificarse en **centralizadas** y **descentralizadas**. Cada tipo de arquitectura presenta ventajas y limitaciones que dependen del grado de autonomía requerido, el entorno en el que operan y las necesidades específicas de la misión.

Entre las tecnologías más utilizadas para implementar estas arquitecturas, destaca el uso de comunicaciones radio mediante antenas omnidireccionales, sectoriales, directivas entre otras. También es muy común, siempre que sea posible debido a su elevado coste, incluir comunicaciones satelitales. Este tipo de redes de comunicaciones aplica a RPAs de gran alcance y autonomía, por ende, de gran envergadura como podría ser el modelo americano MQ-9 Reaper.



Figura 6 Predator RPA

En este contexto, las **Flying Ad Hoc Networks (FANETs)** han surgido como una solución clave. Estas redes, diseñadas específicamente para enjambres de UAV, permiten que los drones formen una red dinámica y flexible, adaptándose a las condiciones cambiantes del entorno operativo. Las FANETs pueden dividirse principalmente en dos categorías: **arquitecturas centralizadas**, donde un nodo principal controla la red, y **arquitecturas descentralizadas**, en las que los drones interactúan directamente entre ellos sin depender de un único nodo central. A continuación, se analizan estas arquitecturas y sus características principales.

2.3.1 Arquitectura Centralizada

En las arquitecturas de comunicaciones **centralizadas**, un nodo principal, generalmente una **Ground Control Station (GCS)**, se encarga de gestionar todas las comunicaciones dentro del enjambre. En este modelo, cada dron mantiene una conexión directa con la GCS, y todos los datos intercambiados entre los drones, como información de posición, estado o decisiones de misión, deben pasar primero por la estación antes de ser reenviados al destino correspondiente. Este enfoque tiene ventajas claras en términos de control centralizado, pero también presenta limitaciones significativas que pueden impactar la eficiencia del sistema.

Ventajas

- **Control centralizado:** La GCS actúa como el núcleo de la operación, lo que permite al operador mantener una supervisión y control total sobre el estado y el comportamiento del enjambre.
- **Baja latencia en comunicaciones individuales:** Al conectar directamente cada dron con la estación de control, las órdenes emitidas desde la GCS llegan rápidamente a los drones, reduciendo la latencia para las decisiones de control global.

Limitaciones

- **Retrasos en las comunicaciones entre drones:** En este modelo, la comunicación directa entre drones no existe. Para que un dron comparta información con otro, los datos deben pasar primero por la GCS, lo que introduce retrasos adicionales. Esto puede ser crítico en misiones que requieren una alta sincronización, como maniobras rápidas o respuestas ante amenazas dinámicas.
- **Alcance limitado:** La conexión directa entre cada dron y la GCS restringe el radio de operación del enjambre a la cobertura efectiva de la estación de control. En áreas amplias, terrenos con obstáculos (como edificios o montañas) o entornos con interferencias electromagnéticas, esta limitación puede reducir significativamente la operatividad del enjambre.
- **Dependencia crítica del nodo central:** En una arquitectura centralizada, la GCS es un punto único de fallo. Si la conexión con la estación se interrumpe o la GCS deja de funcionar, todo el enjambre puede quedar inoperativo. Esta vulnerabilidad hace que el sistema sea menos resiliente frente a interferencias, ataques cibernéticos o fallos técnicos.
- **Escalabilidad limitada:** A medida que aumenta el número de drones en el enjambre, la GCS puede enfrentar dificultades para gestionar el tráfico de datos, lo que podría saturar la red y provocar mayores tiempos de latencia.

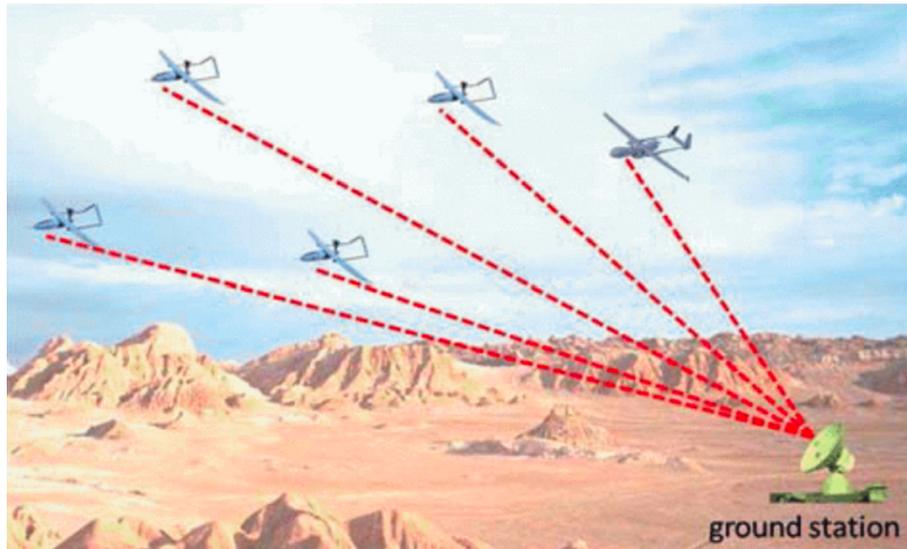


Figura 7 CONOPS arquitectura centralizada

2.3.2 Arquitecturas Descentralizadas

Por otro lado, las **arquitecturas descentralizadas** no dependen de un nodo central y permiten que los drones se comuniquen directamente entre ellos. Estas arquitecturas, también conocidas como **redes de malla** (*mesh networks*), proporcionan mayor flexibilidad y alcance, ya que los drones pueden actuar como nodos intermedios para retransmitir mensajes a través de otros drones hasta llegar a su destino. Dentro de las arquitecturas descentralizadas, se distinguen una serie de configuraciones que se describen a continuación.

2.3.2.1 Arquitectura UAV Ad Hoc

En esta configuración, cada dron funciona como un nodo dentro de una **red ad hoc**, donde todos los drones son responsables de retransmitir mensajes a lo largo de la red. Para garantizar la conectividad con la GCS, se designa un **"dron columna vertebral"** (*backbone UAV*), que actúa como enlace entre el enjambre y la estación de control. Este dron está equipado con dos tipos de transceptores: uno para **comunicaciones de largo alcance** con la GCS y otro para **comunicaciones de corto alcance** con los drones del enjambre. Esta arquitectura es especialmente útil en enjambres homogéneos, donde los drones tienen características de vuelo y movilidad similares, lo que facilita una operación coordinada y eficiente.

Ventajas

- **Simplicidad en la estructura de red:** Al operar como nodos iguales, la red es fácil de configurar y mantener.
- **Baja latencia en la comunicación directa:** La comunicación entre drones dentro de la red se realiza de manera eficiente sin necesidad de intermediarios adicionales.

- **Flexibilidad operativa:** El dron columna vertebral puede actuar como un enlace clave con la GCS, facilitando la operación en áreas remotas o con obstáculos.

Limitaciones

- **Dependencia del dron columna vertebral:** Si el *backbone UAV* falla, la conexión con la GCS puede verse interrumpida.
- **Escalabilidad limitada:** A medida que aumenta el número de drones, la gestión de comunicaciones se vuelve más compleja y puede saturar la red.
- **Requiere alta sincronización:** La operación depende de una sincronización precisa entre los nodos para evitar pérdidas de datos o descoordinación.

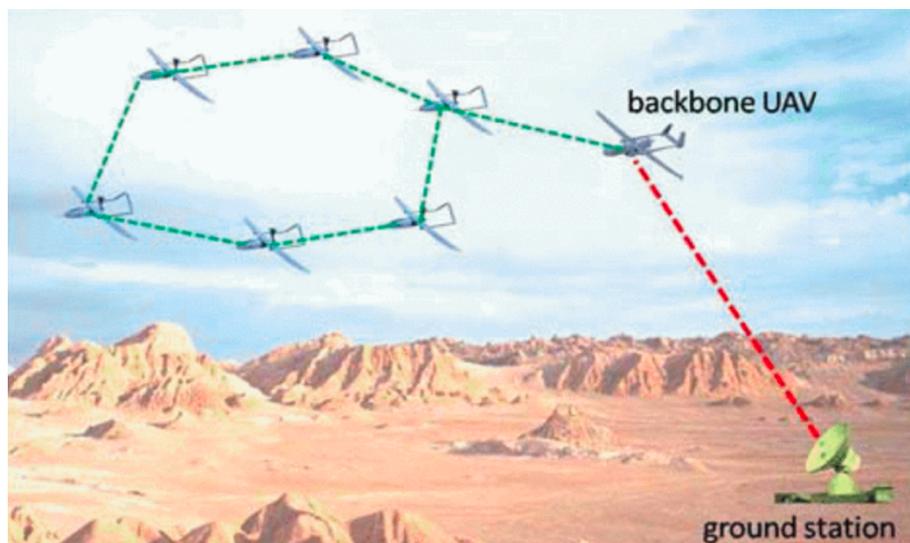


Figura 8 CONOPS arquitectura descentralizada UAV AdHoc

2.3.2.2 Arquitectura de Red de UAV Multi-Grupo

Para superar las limitaciones de los enjambres homogéneos, la **arquitectura Multi-Grupo** organiza el enjambre en **subgrupos** según el tipo de dron. Cada grupo cuenta con un **dron columna vertebral** encargado de conectar el grupo con la GCS. En esta configuración, los drones dentro de un mismo grupo se comunican directamente entre sí, mientras que las comunicaciones entre grupos deben pasar por la GCS. Esta arquitectura es ideal en escenarios donde se combinan drones con diferentes características, como **drones de ala fija** y **multicópteros**, ya que permite adaptarse a sus distintos patrones de vuelo y necesidades de comunicación.

Ventajas

- **Optimización por grupos:** Los drones dentro de un grupo pueden coordinarse de manera eficiente según sus características específicas.

- **Mayor resiliencia:** Si falla un dron en un grupo, el resto puede continuar operando de manera local.
- **Eficiencia en entornos heterogéneos:** Permite la integración de drones con distintas capacidades en una misma operación.

Limitaciones

- **Dependencia de los nodos principales:** Si un dron columna vertebral falla, puede aislar a todo el subgrupo del resto del sistema.
- **Latencia en la comunicación intergrupal:** Las transmisiones entre grupos deben pasar por la GCS, lo que introduce retrasos en escenarios dinámicos.
- **Coordinación compleja:** Requiere algoritmos avanzados para gestionar múltiples subredes y asegurar la sincronización entre grupos.

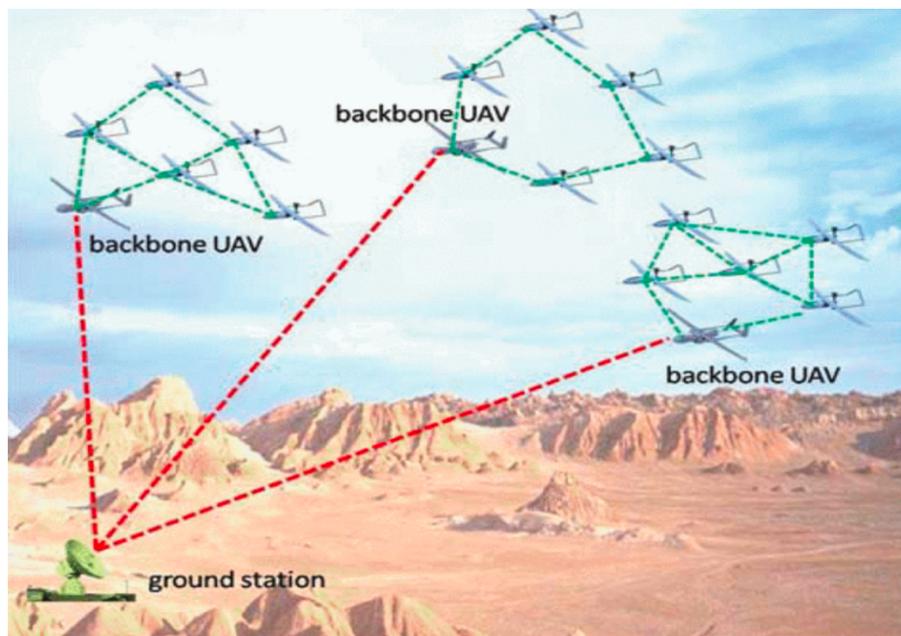


Figura 9 CONOPS arquitectura descentralizada multiples UAV

2.3.2.3 Arquitectura de Red Multi-Capa UAV

La **arquitectura de red Multi-Capa** extiende las capacidades de la arquitectura Multi-Grupo al permitir comunicaciones directas entre los **drones columna vertebral**, eliminando la necesidad de que todas las transmisiones pasen por la GCS. Esta mejora amplía considerablemente el **alcance operativo** del enjambre, ya que los grupos más alejados pueden mantener conectividad a través de estos nodos intermedios sin depender directamente de la estación de control. En este modelo, solo uno de los drones columna vertebral necesita estar en el rango de la GCS, lo que facilita la operación en **áreas de gran extensión** y mejora la **flexibilidad operativa** del sistema.

Ventajas

- **Extensión del alcance operativo:** Permite cubrir grandes áreas al facilitar comunicaciones a través de los drones columna vertebral.
- **Reducción de la dependencia de la GCS:** Solo un nodo necesita estar conectado a la estación, lo que aumenta la autonomía y flexibilidad de la red.
- **Mayor resiliencia:** La comunicación entre drones columna vertebral asegura que la operación continúe incluso si una parte del enjambre pierde contacto con la GCS.

Limitaciones

- **Complejidad de implementación:** Requiere sistemas avanzados de gestión y algoritmos sofisticados para coordinar múltiples niveles de comunicación.
- **Consumo energético elevado:** Los drones columna vertebral deben manejar un mayor volumen de datos, lo que incrementa su consumo energético y limita su autonomía.
- **Vulnerabilidad a interferencias:** La dependencia de nodos columna vertebral puede hacer que la red sea susceptible a interferencias externas.

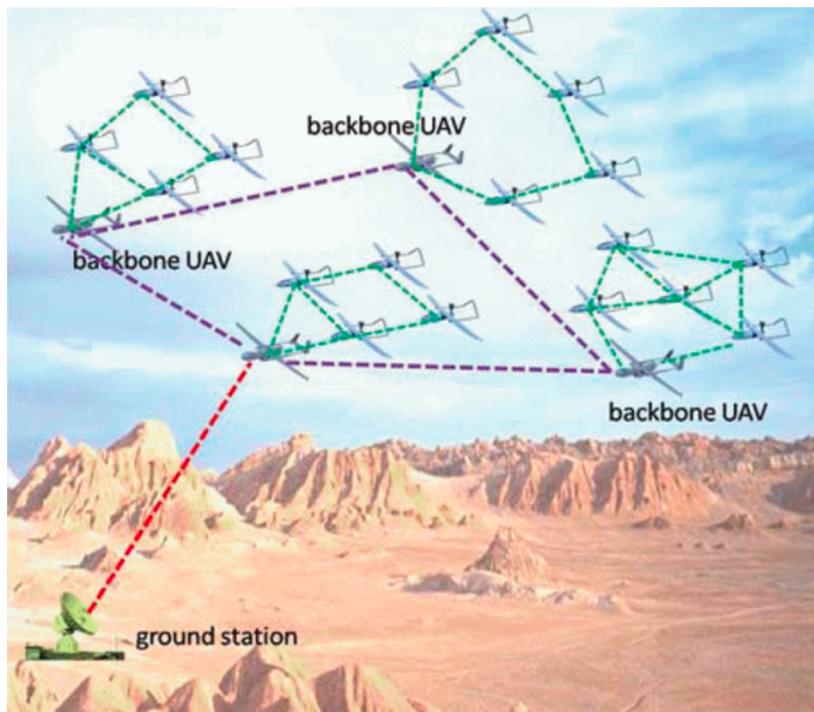


Figura 10 CONOPS arquitectura descentralizada multicapa UAV

Finalmente, se concluye con una comparativa entre las arquitecturas centralizadas y descentralizadas donde se determina que arquitecturas encajan mejor acorde a las operativas de vuelo en enjambre.

2.3.3 Trade-Off entre arquitectura centralizada y descentralizada

Las **arquitecturas centralizadas** y **descentralizadas** representan enfoques opuestos en la gestión y operación de enjambres de drones, cada una con ventajas y limitaciones que las hacen adecuadas según el contexto y los requisitos de la misión.

Las **arquitecturas centralizadas** destacan por su simplicidad en la gestión, ya que toda la información y control se concentran en un único nodo central, generalmente la estación de control terrestre (GCS). Esto proporciona un **control total y supervisión global** del sistema, con tiempos de respuesta reducidos entre la GCS y los drones individuales. Sin embargo, su dependencia del nodo central introduce vulnerabilidades críticas: cualquier fallo en la GCS o en el enlace de comunicación puede inutilizar el sistema. Además, el alcance operativo se ve limitado por la distancia a la GCS, lo que dificulta la operación en entornos amplios o con interferencias. Por otro lado, las **arquitecturas descentralizadas** ofrecen **mayor resiliencia y flexibilidad operativa** al permitir que los drones se comuniquen directamente entre sí, eliminando la dependencia de un único nodo central. Estas arquitecturas, como las redes ad hoc o multi-capa, son ideales para misiones en áreas extensas o dinámicas, donde la comunicación directa y la adaptabilidad son fundamentales. Además, la capacidad de los drones para actuar como repetidores extiende significativamente el alcance operativo. No obstante, las arquitecturas descentralizadas presentan desafíos en cuanto a la **complejidad de gestión**, el **consumo energético** derivado de la retransmisión de datos y la **escalabilidad** en enjambres de gran tamaño.

En conclusión, la elección entre arquitecturas centralizadas y descentralizadas dependerá de los requisitos específicos de la misión. Las **arquitecturas centralizadas** son más adecuadas para operaciones pequeñas y controladas, donde la supervisión central es prioritaria, mientras que las **arquitecturas descentralizadas** son preferibles en escenarios complejos, dinámicos y de gran escala, donde la resiliencia, el alcance y la autonomía son factores clave. Volviendo al propósito del proyecto, la **arquitectura centralizada** es la seleccionada para implementarse en el *proof of concept*, ya que es la que mejor se adapta a la operativa de enjambre en **espectáculos de drones**. En este tipo de aplicaciones, donde las **formaciones coreografiadas y precisas** son el objetivo principal, el control centralizado desde una **Ground Control Station (GCS)** garantiza una gestión sincronizada y eficiente del enjambre. Al centralizar el envío de comandos y la monitorización de los drones, se asegura que las **trayectorias, tiempos y posiciones** se ejecuten con un alto grado de precisión, evitando descoordinaciones que podrían comprometer la calidad visual del espectáculo. Además, la **baja latencia** entre la GCS y cada dron individual permite realizar ajustes en tiempo real durante la operación. En conjunto, esta arquitectura proporciona la **simplicidad, fiabilidad y control** necesarios para validar con éxito las capacidades básicas del vuelo en enjambre dentro de un **contexto controlado**.

2.3.4 Sistema de comunicación

Una vez determinado que la **arquitectura centralizada** es la más adecuada para la operación del enjambre de drones de este proyecto, el siguiente paso, es hacer el trade-off para implementar el sistema de comunicación. Para ello, se deberá tener en cuenta que para esta arquitectura, la **Ground Control Station (GCS)** actúa como el nodo central que emite comandos y recibe telemetría en tiempo real desde cada dron. Esto requiere un sistema de comunicación robusto y confiable que permita mantener una conexión bidireccional continua entre la GCS y el segmento aire.

Los principales requisitos ya vistos anteriormente, requieren que este sistema de comunicación sea capaz de transmitir grandes volúmenes de datos críticos, como comandos de vuelo, parámetros operativos y correcciones de posicionamiento RTK, mientras garantiza **baja latencia, redundancia y seguridad en las transmisiones**. Además, debe soportar entornos operativos dinámicos y, al mismo tiempo, cumplir con los requisitos de interoperabilidad y escalabilidad, esenciales para ampliar la capacidad del enjambre según las necesidades de la misión.

2.3.4.1 Comparativa entre radios convencionales y routers basados en redes IP

Tradicionalmente, las comunicaciones entre los UAVs y la GCS se han realizado mediante **radios convencionales** que operan en frecuencias específicas del espectro radioeléctrico, como las bandas ISM (2.4 GHz y 5.8 GHz). Estas radios han demostrado ser eficaces para operar UAVs en solitario o en formaciones pequeñas, ya que permiten la transmisión de telemetría y comandos de control básicos a distancias relativamente cortas. Sin embargo, cuando se trata de manejar enjambres de drones grandes o misiones que requieren transmitir grandes volúmenes de datos en tiempo real, las radios convencionales presentan serias limitaciones. Estudios recientes, confirman lo anteriormente expuesto. **Kumar y Roseline (2021)**, determinan que los sistemas basados en radios convencionales no son adecuados para manejar la complejidad de las operaciones con enjambres debido a su **ancho de banda limitado** y la **saturación del espectro** en operaciones con muchos UAVs. La interferencia electromagnética entre múltiples radios y la falta de capacidad para gestionar grandes volúmenes de datos de telemetría y video hacen que las radios tradicionales no sean una solución escalable.

This... isn't practical for swarms.



Figura 11 Receptores de radio de UAS. Demostración gráfica del motivo por el que es inviable esta solución

Por otro lado, el uso de **routers** y tecnologías basadas en el **Protocolo de Internet (IP)** ha demostrado ser una alternativa mucho más eficiente para gestionar la comunicación en enjambres de drones. Esta tecnología no solo mejora la **eficiencia y escalabilidad** del sistema, sino que también proporciona un ancho de banda mucho mayor para la transmisión de datos.

En una red basada en IP, cada dron puede tener asignada una **dirección IP única**, lo que facilita la gestión del tráfico de datos. Además, la capacidad de enrutamiento y la priorización de tráfico que ofrecen los routers permiten que la comunicación no se degrade a medida que aumenta el número de drones en la red. Esto es fundamental en operaciones donde la GCS necesita gestionar simultáneamente la telemetría y otros tipos de datos más complejos, como imágenes y videos en alta definición.

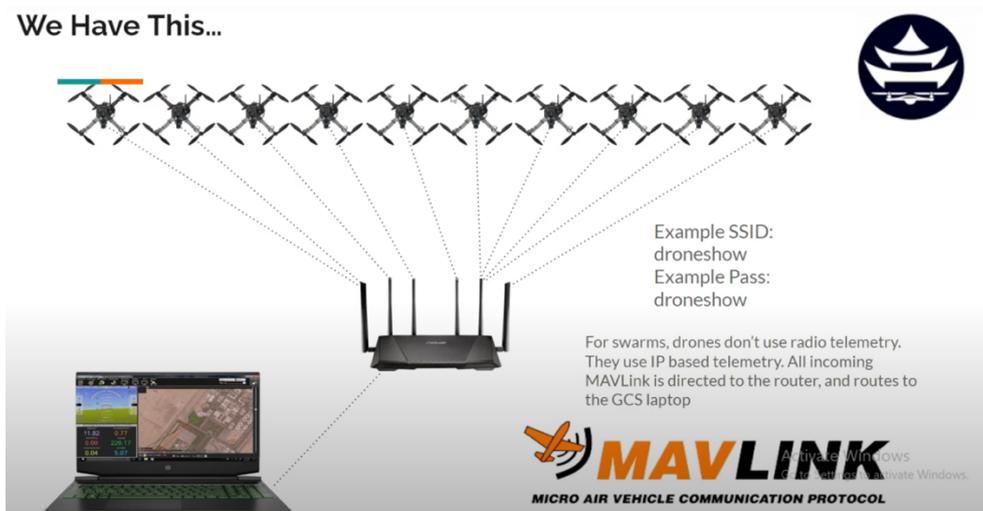


Figura 12 Enlace mediante Wi-Fi. Demostración visual del motivo por el que esta solución es viable

Estudios como el de **Xie et al. (2022)** han demostrado que el uso de routers Wi-Fi en operaciones de enjambres permite una **mejora significativa en la calidad del servicio (QoS)**. Esto asegura que los datos más críticos, como los comandos de control y la telemetría básica, se transmitan con prioridad, mientras que otros tipos de datos, como el video, ocupan un segundo plano sin comprometer la estabilidad del sistema.

Otro de los beneficios del uso de routers Wi-Fi es su capacidad para soportar **redes mesh**. En una red mesh, los drones no solo se comunican con la GCS, sino que también pueden interactuar entre sí. Esta comunicación inter-dron añade una capa de **redundancia** al sistema. En caso de que uno de los drones pierda comunicación directa con la GCS, puede seguir operando mediante otros drones cercanos que actúan como nodos de retransmisión. Esta capacidad de **auto-organización** y resiliencia mejora considerablemente la fiabilidad del sistema y lo hace más adecuado para misiones críticas.

Además, los routers pueden integrarse fácilmente con **redes móviles como 4G y 5G**, lo que extiende el alcance operativo de los enjambres a áreas más remotas. **Chen et al. (2021)** demostraron que al integrar redes celulares con routers Wi-Fi, los enjambres de drones pudieron operar a distancias de hasta 50 kilómetros de la estación base sin degradación significativa de la calidad de la comunicación.

2.3.5 Control y Gestión del Enjambre

El control de un enjambre de drones no se realiza de manera tradicional, como en el caso de un único dron. En lugar de enviar comandos específicos a cada UAV, la GCS envía **comandos de alto nivel** que afectan a todo el enjambre o a subgrupos dentro del mismo. Los drones están equipados con algoritmos avanzados de enjambre que les permiten interpretar estas órdenes y organizarse autónomamente para cumplir los objetivos asignados.

Un aspecto crucial en esta operación es la **comunicación entre drones**. Los UAVs dentro del enjambre comparten información en tiempo real, como su posición y datos de sensores, lo que les permite coordinar sus movimientos y comportamientos. Esta capacidad de cooperación permite que el enjambre funcione como una **unidad cohesiva**, capaz de adaptarse rápidamente a cambios en el entorno o en la misión. Los algoritmos distribuidos de enjambre, como los desarrollados por **Quintero et al. (2019)**, permiten que los drones se ajusten dinámicamente a nuevas condiciones sin la necesidad de intervención humana constante.

La ventaja de este enfoque es que, al reducir la carga sobre la GCS, el sistema se vuelve más robusto y menos propenso a fallos. Los drones pueden realizar ajustes inmediatos en su formación

o trayectoria en respuesta a amenazas o cambios en el entorno sin depender de órdenes directas de la GCS, lo que mejora la **eficiencia operativa** del enjambre.

2.3.6 Resultado del trade-off

La operación de un enjambre de drones presenta desafíos únicos que requieren una infraestructura de comunicaciones avanzada. Los radios convencionales, si bien útiles en aplicaciones más simples, son insuficientes para manejar la complejidad y escala de los enjambres modernos. En cambio, el uso de **routers Wi-Fi** y **redes IP** proporciona una solución más robusta, escalable y capaz de manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Estas tecnologías no solo permiten una mejor coordinación y control de los drones dentro del enjambre, sino que también ofrecen la **flexibilidad** necesaria para operar en diversos entornos, incluidos aquellos con cobertura limitada o donde se requieren conexiones de larga distancia.

A medida que las aplicaciones de los enjambres de drones continúan expandiéndose, desde la logística hasta la vigilancia, la adopción de soluciones avanzadas de comunicación será cada vez más importante para garantizar que estos sistemas puedan operar de manera eficiente, segura y con un rendimiento óptimo en misiones críticas.

3. Demostrador de vuelo

Esta sección presenta el **demostrador de vuelo**, una implementación práctica destinada a validar las capacidades básicas del enjambre de drones en un entorno controlado. El demostrador está compuesto por tres elementos clave: la **Ground Control Station (GCS)**, que actúa como el centro de mando y control del sistema; el **segmento aire**, formado por un dron cuyo diseño integra toda la tecnología necesaria para demostrar la capacidad de volar en enjambre; y las **comunicaciones**, encargadas de garantizar una transmisión eficiente y sincronizada de datos entre la GCS y los UAVs. A modo resumen, se recalca el resultado de los análisis anteriormente presentados: la arquitectura será centralizada y las comunicaciones se establecerán mediante un enlace Wi-Fi.

A lo largo de esta sección, se presentará la **arquitectura del sistema**, se realizará una **descripción y justificación técnica detallada** del porqué del uso de cada uno de los componentes del **segmento tierra, aire**, así como del **sistema de comunicaciones**, se expondrán tanto los elementos de **hardware** como el **software** implementado en cada segmento y su configuración correspondiente, así como los **diagramas de conexión** entre los diferentes elementos del sistema.



Figura 13 Dragón formado por un enjambre de luces

3.1 Arquitectura del sistema

En la siguiente imagen se presenta la arquitectura detallada, dividida en el **segmento aire**, el **segmento tierra** y el sistema de **comunicaciones**, destacando los componentes clave y las direcciones de flujo de información que permiten la operación integrada del sistema.

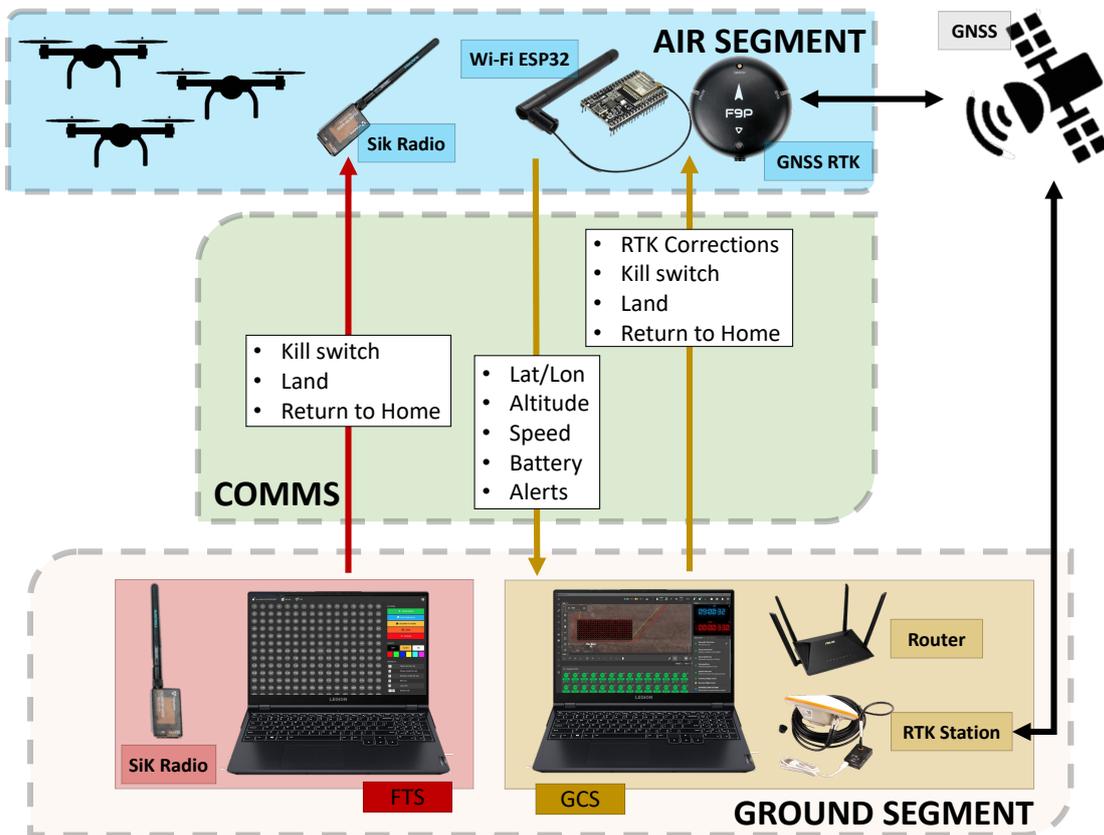


Figura 14 CONOPS del proof of concept

3.1.1 Segmento Aire

El segmento aire está compuesto por los drones del enjambre y los sistemas embarcados que permiten su operación autónoma y coordinada. Los componentes principales y sus funcionalidades son:

- **Drones (UAVs):** Cada dron del enjambre integra sistemas críticos para la navegación, posicionamiento y comunicación. Los drones están equipados con múltiples subsistemas que interactúan entre sí y con los otros segmentos para garantizar una operación segura y precisa.
- **Módulo GNSS RTK (F9P):** Este receptor GNSS con capacidad **RTK (Real-Time Kinematics)** proporciona posicionamiento con precisión centimétrica, esencial para misiones que requieren alta exactitud, como formaciones sincronizadas o inspecciones

técnicas. El módulo recibe señales de corrección RTK desde la estación base del segmento tierra a través del sistema de comunicaciones. Esto permite a los drones ajustar sus posiciones en tiempo real, eliminando errores en el posicionamiento derivados de las señales GNSS estándar.

- **Wi-Fi ESP32:** Este módulo actúa como un enlace de comunicaciones adicional entre los drones y la GCS o entre drones dentro del enjambre. La conexión Wi-Fi es útil para el intercambio de datos de corto alcance, como comandos locales o sincronización de trayectorias, debido a su alta velocidad y baja latencia en distancias reducidas.
- **Sik Radio:** Este módulo es utilizado para comunicaciones a más largo alcance entre el segmento aire y la GCS en el segmento tierra. Proporciona un enlace robusto y fiable para la transmisión de datos de control y telemetría, asegurando que los drones puedan mantener conectividad incluso en entornos complejos.

Funciones del Dron: Los drones integran varias funciones críticas:

- **Kill Switch:** Permite desactivar un dron de manera inmediata en caso de emergencia.
- **Land:** Inicia un aterrizaje automático seguro.
- **Return to Home (RTH):** Permite que el dron regrese automáticamente al punto de origen predeterminado en caso de pérdida de comunicación o finalización de la misión.

3.1.1.1 Dimensionado del UAS

Antes de presentar los componentes del dron, se incluye una captura de pantalla de la herramienta eCalc, utilizada para el dimensionamiento y análisis de sistemas de drones. Se pueden apreciar tanto los parámetros de entrada como los resultados obtenidos del cálculo.

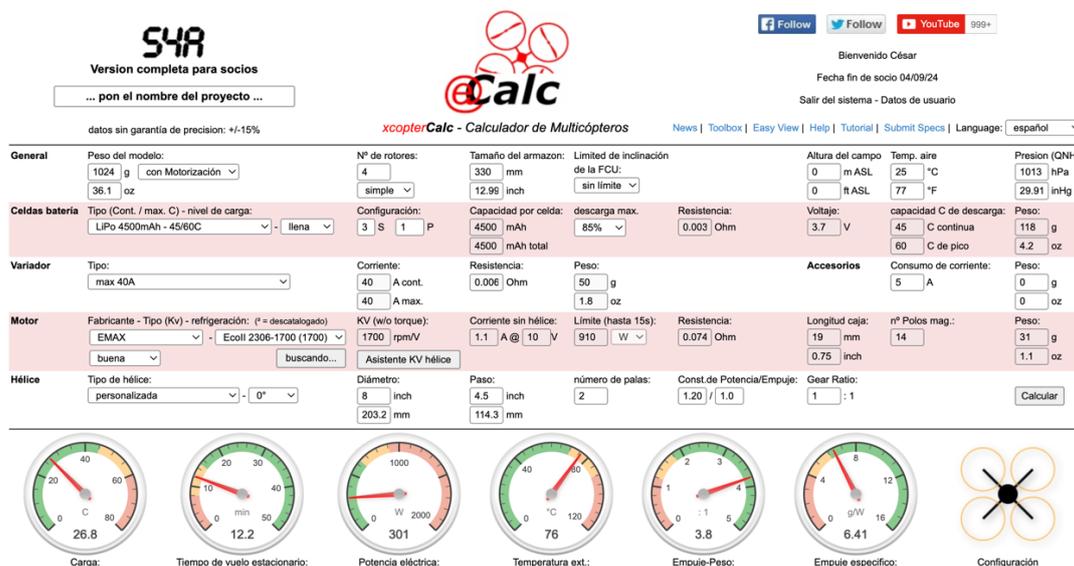


Figura 15 Dimensionado UAS en eCalc

Las características esenciales del dron se resaltan a continuación:

- **Peso total del modelo:** 1,142 g (incluyendo la motorización y batería). Este valor representa una configuración ligera, diseñada para maximizar la eficiencia energética sin comprometer la estabilidad y la capacidad de maniobra. Un peso bajo combinado con una relación empuje-peso alta asegura que el dron pueda responder rápidamente a los comandos, lo que es crucial en misiones coordinadas.
- **Tamaño del brazo:** 330mm. Este tamaño influye directamente en la distribución del peso y la eficiencia del sistema de hélices. Los brazos más largos permiten el uso de hélices más grandes, lo que mejora la eficiencia aerodinámica, especialmente en vuelos estacionarios o a bajas velocidades.
- **Batería LiPo 4500 mAh (3S):** La batería seleccionada tiene una capacidad nominal de **4,500 mAh** y opera a **11.1V (3S)**. Este diseño asegura un equilibrio entre peso y capacidad energética, ofreciendo la potencia necesaria para maniobras rápidas y sostenidas.
 - **Nivel de descarga:** 85%. Este nivel operativo asegura que la batería no se someta a ciclos de descarga extremos, prolongando su vida útil y manteniendo un rendimiento consistente.
 - **Resistencia interna:** 0,033 ohm. Este valor es indicativo de una batería de buena calidad, con baja pérdida de energía durante la transferencia hacia los sistemas del dron.
- **Tiempo estimado de vuelo estacionario:** 12,2 minutos. Este tiempo es adecuado para misiones cortas y dinámicas propias del swarming. Aunque la autonomía podría ser limitada en aplicaciones más largas, es suficiente para escenarios donde se priorizan maniobras precisas y rápidas.
- **Consumo de corriente promedio:** 18 A. Este valor asegura un consumo balanceado, compatible con la capacidad de la batería, garantizando un rendimiento estable y predecible.
- **Motores EMAX 2306-1700 kV:** Estos motores están optimizados para proporcionar un empuje considerable con un bajo consumo energético.
 - **Kv:** 1700 (revoluciones por voltio). Este valor garantiza una respuesta rápida a los cambios de aceleración, ideal para las maniobras dinámicas y sincronizadas requeridas en operaciones de enjambre. Finalmente se usarán unos ligeramente distintos.

- **Potencia máxima sin hélice:** 40,4 A. Este nivel de potencia asegura que los motores puedan manejar las demandas más exigentes durante maniobras rápidas o en condiciones de carga alta.
- **Hélices (8x4,5 pulgadas):** Estas hélices están diseñadas para ofrecer un equilibrio entre empuje y eficiencia energética. Las hélices de menor tamaño, en combinación con motores de alto Kv, permiten una rápida respuesta a los comandos, lo que es crucial en aplicaciones de enjambre donde los drones necesitan realizar ajustes constantes en sus trayectorias.
- **Relación empuje-peso:** 3,8. Este valor significa que el dron tiene más del doble de la potencia necesaria para contrarrestar su peso, permitiendo un alto grado de maniobrabilidad y capacidad de realizar maniobras de alta intensidad sin comprometer la estabilidad.

El análisis de performance indica que este UAS es altamente adecuado para operaciones de swarming. La configuración energética, aunque limitada en autonomía, es suficiente para misiones dinámicas y breves, donde se priorizan maniobras rápidas y sincronizadas. Una relación empuje-peso de 3,8 asegura un control excepcional en formaciones complejas. Por otro lado, la integración de motores y hélices eficientes proporciona un equilibrio entre potencia y consumo energético.

Cada vehículo aéreo no tripulado en el enjambre está equipado con diversos sistemas de hardware, que incluyen unidades de control de vuelo, sensores, sistemas de navegación GPS, cámaras y transmisores de comunicación. Estos componentes permiten que los drones ejecuten las órdenes enviadas desde la GCS. A continuación, se describen los componentes que conforman el segmento aire.

3.1.1.2 Arquitectura UAS

A continuación, se muestra una imagen en la que se presenta la arquitectura de un **Sistema Aéreo No Tripulado** diseñada específicamente para la operación de un dron en un entorno de enjambre. Esta arquitectura incluye una integración de componentes electrónicos y sistemas de comunicación clave que permiten el control, la navegación y la ejecución de las misiones. A continuación, se describen los elementos principales y su función en el sistema.

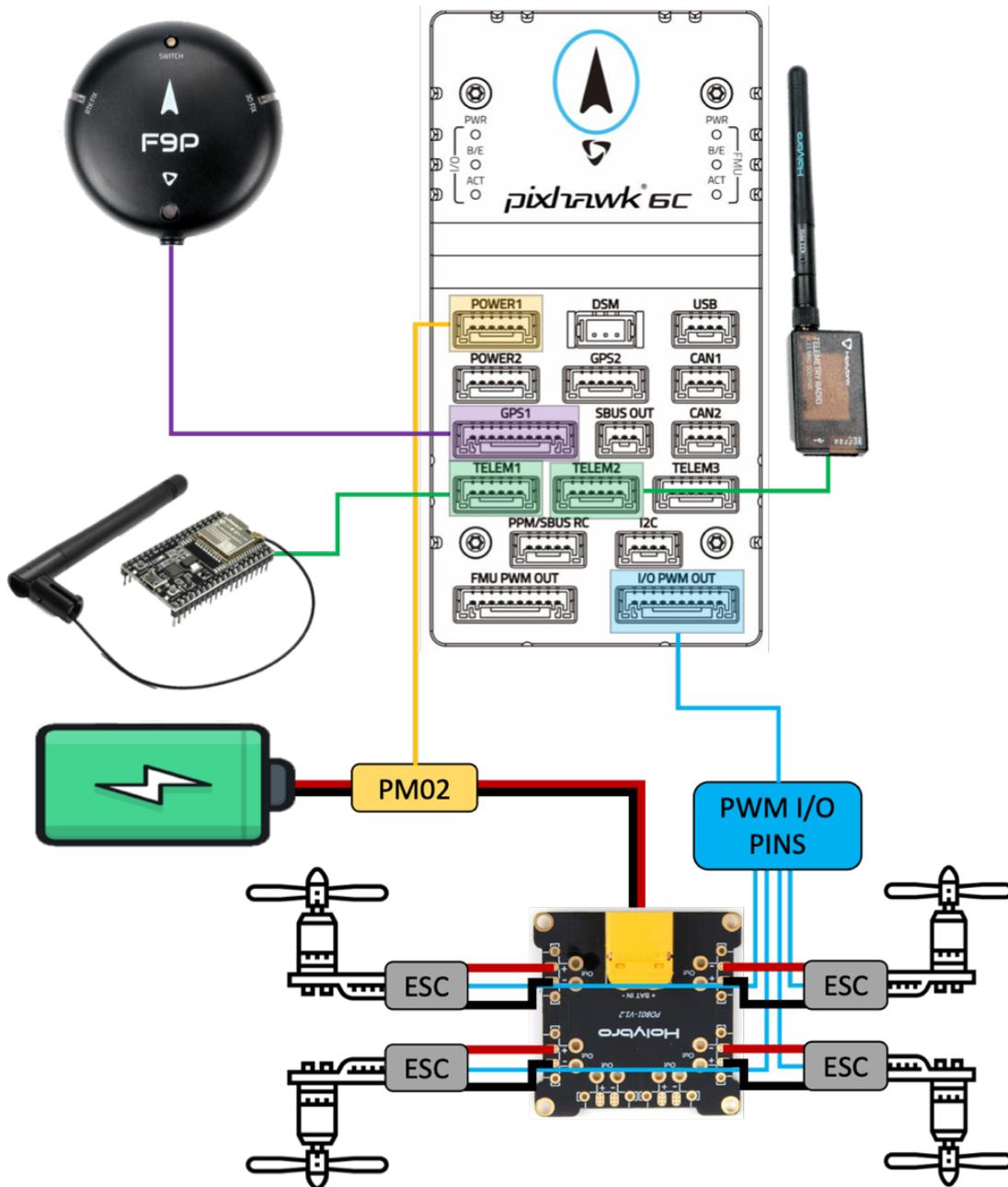


Figura 16 Arquitectura y conexión demostrador de vuelo UAS

3.1.1.2.1 Pixhawk 6C

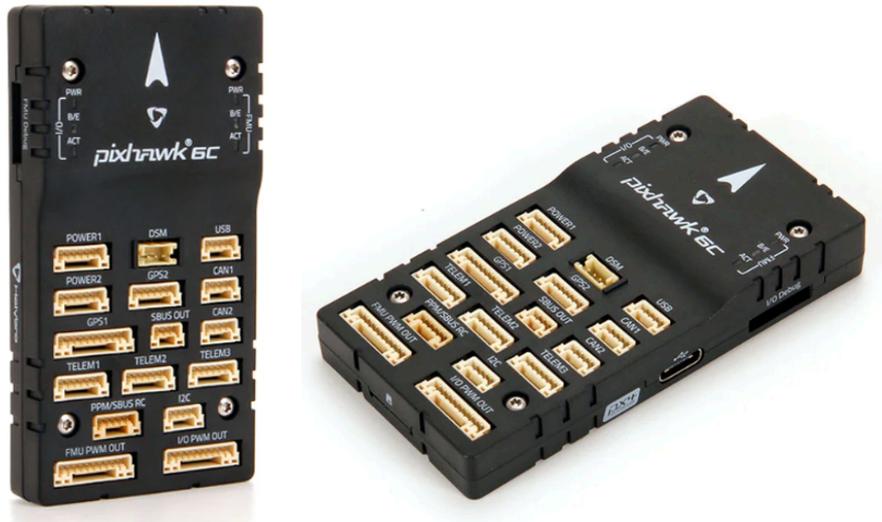


Figura 17 Pixhawk 6C

El **Pixhawk 6C** es el **controlador de vuelo central** que actúa como el cerebro del dron, gestionando todas sus operaciones, desde el control de estabilidad hasta la ejecución de misiones autónomas. Este sistema recibe datos en tiempo real de los sensores integrados y ejecuta los comandos enviados desde la Ground Control Station (GCS), asegurando un control preciso y confiable del dron. Su compatibilidad con plataformas de software de código abierto como **ArduPilot** y **PX4** lo convierte en una herramienta versátil, apta para aplicaciones que van desde la investigación hasta el uso comercial de UAVs.

Desde el punto de vista técnico, el Pixhawk 6C está basado en un **procesador STM32H7**, que ofrece una alta capacidad de procesamiento para manejar grandes volúmenes de datos de vuelo en tiempo real. Este controlador integra una serie de sensores esenciales, como **giroscopios**, **acelerómetros** y **magnetómetros**, que proporcionan una estabilización precisa y un vuelo autónomo confiable. Además, soporta navegación GNSS y la ejecución de misiones automáticas preprogramadas, lo que es fundamental en operaciones complejas como las de enjambres de drones.

El diseño modular del Pixhawk 6C incluye múltiples interfaces de comunicación, como **I2C**, **UART**, **SPI** y **CAN**, permitiendo la integración de diversos módulos adicionales, como sensores de proximidad, cámaras, sistemas GNSS y otros dispositivos avanzados. Estas capacidades no solo amplían su funcionalidad, sino que también aseguran una alta adaptabilidad para satisfacer los requisitos específicos de distintas misiones y configuraciones. En conjunto, el controlador de

vuelo Pixhawk 6C combina potencia, precisión y versatilidad, posicionándose como un componente central en la arquitectura de drones de alto rendimiento.

La imagen de la arquitectura muestra el conexionado implementado en el controlador de vuelo **Pixhawk 6C**. El **GNSS RTK (F9P)** está conectado al puerto **GPS1** para proporcionar datos de posicionamiento con precisión centimétrica. El módulo de telemetría **Sik Radio**, utilizado para la comunicación con la Ground Control Station (GCS), está conectado al puerto **TELEM2**, mientras que el módulo **Wi-Fi ESP32** se conecta al puerto **TELEM1** para proporcionar un enlace local de corto alcance. La gestión de energía es manejada por el módulo **PM02**, que distribuye la energía desde la batería hacia el controlador Pixhawk a través del puerto **POWER1** y reporta el estado de la batería al sistema. Finalmente, el controlador Pixhawk está conectado a los **ESCs (Electronic Speed Controllers)** mediante los puertos **PWM I/O PINS**, lo que permite controlar los motores del dron. Este diseño modular asegura un flujo eficiente de datos y energía, garantizando la operación confiable del sistema.

Todos estos elementos, no tienen sentido sin un firmware que los coordine y permita la correcta recepción, procesamiento e interpretación de los mismos. Por ello, a continuación, se describe el firmware flasheado en la controladora de vuelo para poder hacer misiones de enjambre.

3.1.1.2.1.1 Skybrush firmware

El **Skybrush Firmware** es el software instalado directamente en los UAVs que conforman el enjambre, diseñado para gestionar la ejecución de comandos enviados desde la Ground Control Station (GCS) y asegurar que los drones respondan de manera coordinada a órdenes tanto colectivas como autónomas. Este firmware no solo garantiza una comunicación eficiente entre los drones y la GCS, sino que también permite el intercambio de información crítica entre los UAVs, asegurando una sincronización precisa en el contexto de misiones complejas.

Técnicamente, el Skybrush Firmware está basado en **ArduPilot**, una plataforma de piloto automático de código abierto reconocida por su versatilidad y confiabilidad en la operación de vehículos no tripulados. Utiliza el protocolo de comunicación **MAVLink**, ampliamente adoptado para la interacción entre drones y sistemas de control, que permite un intercambio de datos robusto y de baja latencia. Este diseño asegura que los drones dentro del enjambre ejecuten sus tareas de manera precisa y coordinada, incluso en escenarios dinámicos.

El firmware está optimizado para ser compatible con una amplia variedad de plataformas de hardware, lo que lo hace altamente adaptable a diferentes configuraciones de drones. Además, soporta **actualizaciones OTA (Over-The-Air)**, lo que facilita la mejora continua del sistema sin necesidad de acceso físico a los UAVs. Este enfoque asegura que el enjambre pueda mantenerse

actualizado con las últimas mejoras y capacidades, maximizando su rendimiento y adaptabilidad en misiones críticas.

3.1.1.2.2 H-RTK F9P GNSS Rover



Figura 18 H-RTK F9P

El **H-RTK F9P GNSS Rover** es un receptor de alta precisión montado en los drones, diseñado para trabajar en conjunto con el sistema de base GNSS y proporcionar correcciones de posicionamiento **RTK (Real-Time Kinematics)** en tiempo real. Este rover recibe datos de corrección desde la estación base (**H-RTK F9P Base**), lo que permite a los UAVs alcanzar una precisión posicional de hasta centímetros. Esta capacidad es esencial en aplicaciones donde la exactitud es crítica, como misiones de cartografía, inspecciones técnicas u operaciones autónomas de alta precisión.

Desde un punto de vista técnico, el H-RTK F9P está basado en el **chipset u-blox ZED-F9P**, reconocido por su capacidad de recibir señales simultáneamente de múltiples constelaciones de satélites, incluyendo **GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou**. Esta compatibilidad mejora significativamente la robustez y confiabilidad del posicionamiento, especialmente en entornos complicados como áreas urbanas densas o terrenos con obstrucciones. Además, soporta **doble frecuencia (L1 y L2)**, lo que no solo incrementa la precisión, sino que también reduce los errores derivados de factores atmosféricos y de multitrayectoria.

El módulo se comunica con el controlador de vuelo a través de interfaces **UART o USB**, asegurando un flujo de datos eficiente y estable hacia el sistema principal del dron. Está específicamente optimizado para aplicaciones en drones que requieren una navegación precisa y fiable, siendo una pieza clave para misiones autónomas y coordinadas donde el error en el posicionamiento puede comprometer el éxito de la operación. Este diseño asegura que los drones puedan mantener trayectorias exactas, realizar maniobras complejas y operar con un alto nivel de confianza en una variedad de entornos operativos.

3.1.1.2.3 WiFi module DevKit-C ESP32-WROOM-32U

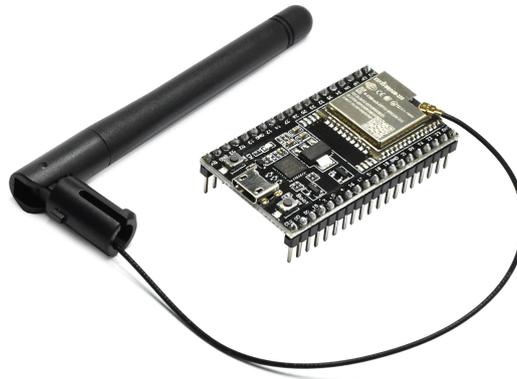


Figura 19 ESP-32 WiFi module

El **DevKit-C ESP32-WROOM-32U** es un módulo de desarrollo diseñado para proporcionar **conectividad inalámbrica** mediante **Wi-Fi** y **Bluetooth**, lo que permite a los drones conectarse a redes locales o comunicarse directamente con la Ground Control Station (GCS) a través de Wi-Fi. Este módulo es ideal para drones que requieren transmitir datos en tiempo real, como telemetría, o recibir comandos remotos, eliminando la necesidad de conexiones físicas y mejorando la flexibilidad y la movilidad de las misiones. Su versatilidad lo hace una solución clave para sistemas de enjambre, donde se necesita una conectividad eficiente y confiable entre múltiples UAVs y la GCS.

Desde un punto de vista técnico, el **ESP32-WROOM-32U** está basado en el chip **ESP32**, que cuenta con un **procesador de doble núcleo** que opera a una velocidad de reloj de hasta **240 MHz**, lo que lo hace adecuado para ejecutar aplicaciones de comunicación complejas. Dispone de **512 KB de RAM** y es compatible con los estándares **Wi-Fi 802.11 b/g/n** y **Bluetooth 4.2**, lo que permite una conectividad inalámbrica versátil y de bajo consumo. Una de sus características destacadas es la inclusión de una **antena externa U.FL**, que mejora significativamente el alcance y la estabilidad de la señal, especialmente en entornos donde las interferencias o la distancia representan un desafío.

Este módulo es particularmente efectivo en aplicaciones de **telemetría en tiempo real**, ya que permite la transmisión continua de datos desde el dron hacia la GCS, así como en escenarios de **control remoto avanzado**, donde se necesita una respuesta rápida y fiable. Su diseño compacto y su capacidad para integrarse con sistemas de hardware más amplios lo convierten en una herramienta esencial para drones en misiones avanzadas que requieren comunicaciones ágiles y de alta calidad.

3.1.1.2.4 SiK Telemetry radio



Figura 20 SiK radio

La **SiK Telemetry Radio V3** es un sistema de comunicación por radiofrecuencia diseñado para establecer **enlaces de telemetría de largo alcance** entre los UAVs y la Ground Control Station (GCS). Este módulo es fundamental para monitorear en tiempo real parámetros críticos de vuelo, como **posición, velocidad, altitud y estado del sistema**, proporcionando al operador la información necesaria para la toma de decisiones en misiones **autónomas** o **semiautónomas**. Su diseño está optimizado para garantizar una conectividad confiable en entornos diversos, como áreas abiertas o urbanas, donde un enlace robusto es crucial para el éxito de la operación.

Desde una perspectiva técnica, la SiK Telemetry Radio V3 opera en la banda de **433 MHz**, que proporciona un equilibrio ideal entre **alcance** y **penetración de señal**. Esta banda es especialmente útil en entornos mixtos, ofreciendo estabilidad en áreas con obstáculos moderados y distancias largas. El módulo tiene una potencia de transmisión ajustable entre **11 dBm y 30 dBm**, lo que permite alcanzar distancias de varios kilómetros dependiendo de las condiciones ambientales y la interferencia presente. Esto lo hace adecuado para misiones donde la **persistencia del enlace** es esencial.

La radio utiliza el protocolo de comunicación **SiK**, diseñado para ser altamente **eficiente** y **robusto** en la transmisión de datos en tiempo real. Este protocolo minimiza las pérdidas de datos y garantiza que la telemetría se transmita de manera continua y confiable, incluso en entornos con niveles de ruido elevados. Además, el módulo es **compatible con MAVLink**, el protocolo estándar para drones que operan con **ArduPilot** o **PX4**, lo que asegura su versatilidad y capacidad para integrarse en una amplia gama de plataformas UAV. Gracias a su combinación de largo alcance, eficiencia de transmisión y compatibilidad con estándares amplios, la **SiK Telemetry Radio V3** se posiciona como un componente esencial en sistemas de drones que requieren telemetría confiable para operaciones críticas.

3.1.1.2.5 Power Distribution Board

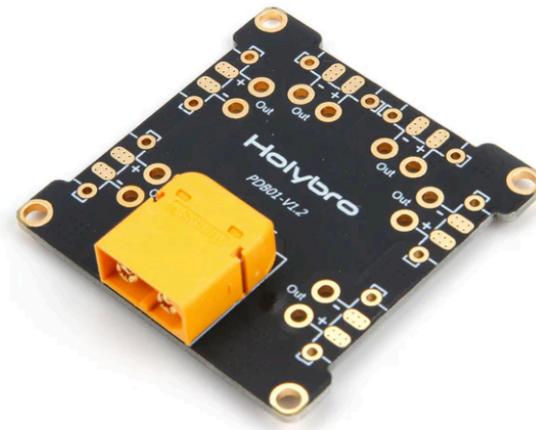


Figura 21 PDB

La **Placa de Distribución de Potencia (PDB)** de Holybro es un componente clave en la gestión eficiente de la energía dentro de los drones. Su principal función es **distribuir la energía** proveniente de la batería hacia los distintos componentes eléctricos, como los controladores de velocidad electrónicos (ESCs), el controlador de vuelo, los receptores y otros módulos electrónicos esenciales. Además, esta PDB está diseñada para optimizar la estabilidad del sistema, integrando características avanzadas como **filtros para reducir el ruido eléctrico**, protegiendo así los componentes sensibles de interferencias o picos de tensión.

Desde el punto de vista técnico, la PDB de Holybro está diseñada para trabajar con baterías de hasta **6S (22.2V)**, permitiendo un amplio rango de aplicaciones en drones de alto rendimiento. Posee salidas dedicadas que distribuyen energía directamente a los ESCs y otros módulos, asegurando una entrega de potencia consistente y equilibrada. La placa está fabricada con **materiales de alta calidad**, lo que le permite manejar **corrientes elevadas** sin riesgo de sobrecalentamiento, garantizando la fiabilidad operativa incluso en misiones exigentes.

Además, la PDB incluye **reguladores de voltaje integrados**, que convierten la energía de la batería en un suministro estable y regulado, específicamente adaptado para alimentar componentes sensibles como el controlador de vuelo. Esto protege al sistema contra picos de tensión que podrían comprometer su funcionamiento. En algunas versiones avanzadas, la PDB incorpora **filtros LC**, que reducen el **ruido eléctrico** generado por los ESCs, mejorando la calidad de la señal y el rendimiento global del sistema.

Con estas características, la **PDB de Holybro** no solo asegura una distribución energética eficiente, sino que también mejora la estabilidad y fiabilidad del dron, lo que la convierte en un elemento esencial para sistemas que requieren un rendimiento óptimo y seguro.

3.1.1.2.6 Módulo de potencia PM02

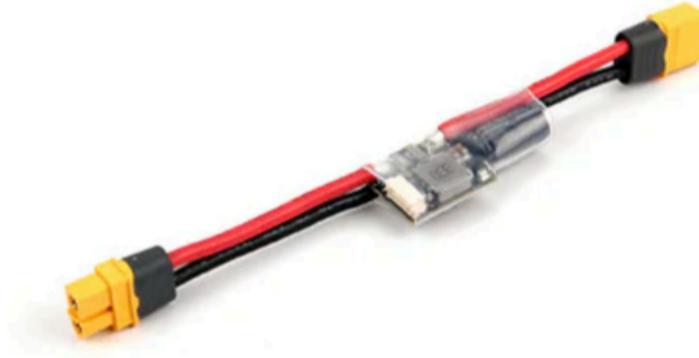


Figura 22 PM02

El **módulo de potencia** es un componente esencial para proporcionar la **alimentación eléctrica** necesaria al controlador de vuelo y otros sistemas electrónicos del dron, asegurando un suministro estable y confiable durante el vuelo. Este módulo no solo distribuye energía, sino que también **monitorea el consumo eléctrico** en tiempo real, enviando esta información al controlador de vuelo. Esto permite al sistema realizar un seguimiento del uso de la batería, optimizando la eficiencia energética y proporcionando datos críticos para la planificación y ejecución de misiones prolongadas o complejas.

Desde el punto de vista técnico, el módulo de potencia diseñado para el **Pixhawk 6C** es compatible con baterías de hasta **6S (22.2V)**, lo que lo hace adecuado para configuraciones de alta potencia. Posee la capacidad de medir consumos de corriente de hasta **120A**, proporcionando un rango amplio para aplicaciones exigentes. Este diseño garantiza una **alimentación estable** a los sistemas críticos del dron, protegiéndolos contra **picos de voltaje** o **sobrecargas**, que podrían comprometer la estabilidad o integridad de los componentes electrónicos.

Además, la capacidad del módulo para proporcionar datos precisos en tiempo real sobre el consumo de energía resulta crucial en misiones donde la **gestión eficiente de la batería** es un factor determinante. Esto permite al operador o al sistema autónomo realizar ajustes dinámicos en las operaciones del dron, maximizando la duración del vuelo y minimizando riesgos asociados con niveles bajos de batería. En conjunto, este módulo de potencia combina fiabilidad, precisión y funcionalidad avanzada, consolidándose como una pieza fundamental en sistemas UAV modernos.

3.1.1.2.7 Frame F330



Figura 23 F330 Frame

El **Frame F330** es un chasis robusto y ligero, diseñado específicamente para alojar los componentes esenciales de un dron cuadricóptero. Proporciona una base **estable y resistente** para montar motores, controladores de vuelo, baterías y otros sistemas electrónicos necesarios para el funcionamiento de un UAV. Su diseño optimizado lo hace ideal para drones de tamaño pequeño y medio, donde la **maniobrabilidad**, la **eficiencia** y la estabilidad son factores clave, especialmente en vuelos de corta duración o en entornos controlados.

Desde el punto de vista técnico, el Frame F330 está fabricado con una combinación de **fibra de carbono** y **plástico reforzado**, ofreciendo un equilibrio perfecto entre **ligereza** y **resistencia estructural**. Su diagonal es de **330 mm**, lo que lo hace adecuado para configuraciones de cuadricópteros que utilizan hélices de hasta **8 pulgadas**. Este tamaño proporciona suficiente espacio para acomodar cuatro motores y otros componentes necesarios, manteniendo una estructura compacta y eficiente.

El marco tiene un peso aproximado de **150 gramos**, lo que contribuye significativamente a mantener bajo el peso total del dron. Esto maximiza la **eficiencia energética**, permitiendo que los motores y la batería operen con mayor rendimiento. Además, el diseño del F330 es **modular**, lo que facilita la integración, reparación y mantenimiento de los componentes, siendo una opción versátil y confiable para desarrolladores de drones que buscan combinar rendimiento y simplicidad en sus configuraciones.

3.1.1.2.8 Batería



Figura 24 Batería

Las **baterías LiPo (polímero de litio)** son la fuente de energía principal utilizada en drones, ofreciendo una **alta relación potencia-peso** que las hace ideales para aplicaciones donde la ligereza y el rendimiento energético son cruciales. En el caso de configuraciones con baterías de **4500 mAh**, estas proporcionan la energía necesaria para alimentar tanto los motores como los sistemas electrónicos del UAV, garantizando un equilibrio entre **autonomía** y **maniobrabilidad**. Su capacidad para entregar corrientes altas de manera instantánea las hace especialmente útiles en misiones que requieren maniobras rápidas o vuelos dinámicos.

Desde un punto de vista técnico, las baterías LiPo de **4500 mAh** suelen operar en configuraciones de **3S (11.1V)**, lo que ofrece una combinación óptima entre **potencia** y **duración del vuelo**. Esta configuración permite una velocidad de rotación adecuada en los motores y asegura un tiempo de vuelo suficiente para misiones cortas o medianas, como las propias de un enjambre de drones. Estas baterías están diseñadas para manejar **grandes corrientes instantáneas**, lo cual es esencial para soportar aceleraciones rápidas y cambios bruscos de dirección, características frecuentes en vuelos coordinados.

Adicionalmente, el diseño compacto y ligero de estas baterías contribuye a mantener bajo el peso total del dron, maximizando la eficiencia de los motores y mejorando la estabilidad del sistema. Sin embargo, es importante seguir **recomendaciones de seguridad estrictas**, como utilizar cargadores adecuados, evitar la sobrecarga y almacenarlas en condiciones controladas para minimizar riesgos de sobrecalentamiento o explosión. Con el uso adecuado, las baterías de **4500 mAh LiPo** representan una solución confiable y eficiente para drones que requieren un rendimiento equilibrado entre potencia, autonomía y maniobrabilidad.

3.1.1.2.9 Motores



Figura 25 Motores

Los **motores 2212 1000KV** son motores eléctricos **brushless** diseñados para generar la fuerza de propulsión necesaria en drones de tamaño medio. Su diseño combina **velocidad de rotación** y **eficiencia energética**, lo que los convierte en una opción ideal tanto para drones recreativos como para aplicaciones más profesionales que requieren una propulsión **estable** y **confiable**. Gracias a su versatilidad, estos motores son ampliamente utilizados en configuraciones de cuadricópteros, donde la eficiencia y la capacidad de carga son factores clave.

Desde un punto de vista técnico, los motores **2212 1000KV** tienen una velocidad de giro de **1000 RPM por cada voltio aplicado**, lo que los hace adecuados para sistemas que operan con baterías de **3S (11.1V)** o **4S (14.8V)**. Este rango de operación ofrece un equilibrio entre **potencia** y **consumo energético**, permitiendo un rendimiento óptimo para misiones de duración media. Al ser motores **sin escobillas**, proporcionan una mayor **durabilidad**, menor mantenimiento y una eficiencia significativamente superior en comparación con los motores con escobillas tradicionales.

Estos motores son compatibles con hélices de **8 a 10 pulgadas**, lo que les permite generar el empuje necesario para levantar drones de hasta **1.5 kg de peso**. Esta capacidad los hace ideales para configuraciones que requieren una buena relación potencia-peso, manteniendo la maniobrabilidad y estabilidad incluso en condiciones de carga máxima. En conjunto, los motores **2212 1000KV** destacan por su rendimiento confiable y eficiente, adaptándose a una amplia variedad de aplicaciones y configuraciones en drones de tamaño mediano.

3.1.1.2.10 Electronic Speed Controllers (ESCs)



Figura 26 ESCs

Los **Electronic Speed Controllers (ESCs) de 30A** son dispositivos electrónicos esenciales para la operación de drones, encargados de **regular la potencia** suministrada a los motores **brushless**. Su función principal es ajustar la velocidad de los motores en tiempo real, en respuesta a los comandos enviados por el controlador de vuelo. Este control preciso es fundamental para garantizar la **estabilidad, maniobrabilidad y respuesta dinámica** del UAV durante el vuelo, especialmente en configuraciones que requieren cambios rápidos en la potencia o maniobras complejas.

Desde una perspectiva técnica, estos ESCs están diseñados para manejar una corriente máxima de **30 amperios**, lo que los hace compatibles con motores de tamaño mediano, como los **2212 1000KV**, y configuraciones que requieren un empuje moderado a elevado. Son compatibles con baterías de **2S a 4S (7.4V a 14.8V)**, lo que proporciona flexibilidad para adaptarse a diversas configuraciones de drones. Esta capacidad los hace ideales para cuadricópteros y sistemas de tamaño medio que operan con hélices de 8 a 10 pulgadas.

Muchos modelos de ESCs de 30A incorporan soporte para **protocolos de comunicación avanzada** como **DSHOT, PWM y Oneshot**, que ofrecen un control más preciso sobre la velocidad de los motores. Estos protocolos permiten una **respuesta más rápida** y reducen los tiempos de latencia entre el controlador de vuelo y los motores, lo que resulta especialmente útil en maniobras exigentes o vuelos coordinados, como los realizados en enjambres de drones.

Además, estos ESCs suelen incluir sistemas de protección contra **sobrecorrientes, sobrecalentamiento y cortocircuitos**, asegurando una operación confiable y prolongando la vida útil de los componentes. En conjunto, los **ESCs de 30A** son una solución confiable y eficiente para drones que requieren un control preciso de sus motores, adaptándose a una amplia variedad de aplicaciones en el ámbito recreativo y profesional.

3.1.1.2.11 Propellers 8045 Prop CW CCW



Figura 27 Propellers

Las **hélices 8045** son componentes esenciales en los drones, responsables de generar el **empuje necesario** para mantener el vuelo y realizar maniobras. Estas hélices se montan en motores **brushless** y están disponibles en configuraciones **CW (giro horario)** y **CCW (giro antihorario)**, lo que permite al dron mantener su **estabilidad aerodinámica** al contrarrestar las fuerzas de rotación. Diseñadas para drones de tamaño medio, como cuadricópteros con una diagonal de aproximadamente 330 mm, estas hélices ofrecen una combinación equilibrada de **empuje** y **eficiencia energética**, siendo ideales para aplicaciones que requieren maniobrabilidad y autonomía.

Desde el punto de vista técnico, las hélices **8045** tienen una longitud de **8 pulgadas** y un paso de **4.5 pulgadas**, lo que las hace adecuadas para configuraciones que requieren un equilibrio entre fuerza de empuje y consumo energético. Están optimizadas para trabajar con motores que operan en un rango de **900KV a 1200KV**, proporcionando un rendimiento consistente y estable. Estas características aseguran un vuelo suave y un control preciso, incluso en maniobras exigentes.

Las hélices están fabricadas en **plástico de alta resistencia** o en **fibra de carbono**, dependiendo de la versión. La versión de plástico ofrece un equilibrio entre durabilidad y coste, mientras que la de fibra de carbono destaca por su ligereza y mayor resistencia, lo que mejora la eficiencia y reduce las vibraciones. Gracias a su diseño optimizado, las hélices **8045** son capaces de generar un empuje estable y confiable, siendo esenciales para garantizar la **estabilidad** y **maniobrabilidad** del dron en diversas condiciones de vuelo.

3.1.1.3 Fabricación y Ensamblaje del UAS

El proceso de **fabricación y ensamblaje del UAS** ha sido meticulosamente planificado y ejecutado para garantizar una **estructura robusta**, una **distribución eficiente de peso**, y la **funcionalidad óptima** de todos sus sistemas. Este trabajo comenzó con el diseño de piezas personalizadas en **SolidWorks**, lo que permitió adaptar cada componente a las necesidades específicas del dron. Estas piezas fueron diseñadas para **organizar de manera ordenada** todos los elementos, mejorando la **estabilidad estructural**, optimizando la **distribución del peso** y asegurando la **protección de los componentes electrónicos** frente a golpes, vibraciones y otros riesgos.

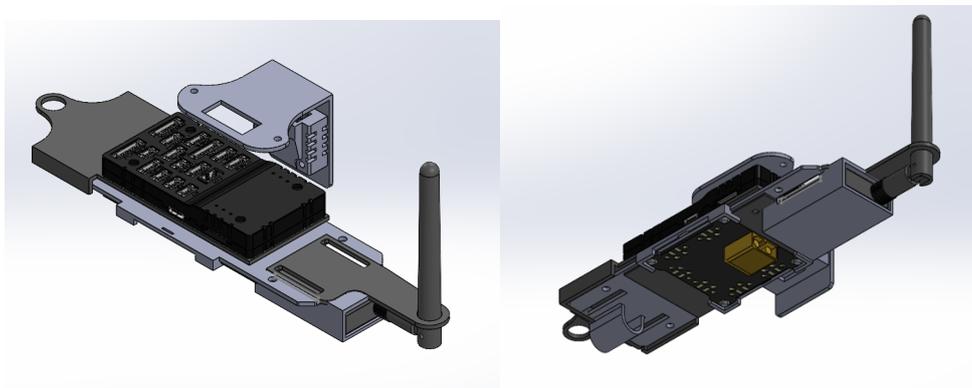


Figura 28 Ensamblaje CAD

Para la fabricación de estas piezas, se utilizó impresión en 3D en un proceso iterativo. Se realizaron varios intentos y ajustes para garantizar un encaje perfecto. Durante este proceso, se implementó la técnica de inserción de **roscas y tornillos embebidos**, en la que se pausaba la impresión en puntos estratégicos para insertar estos elementos dentro de las piezas. Esta técnica aseguró una fijación robusta, reduciendo el desgaste y aumentando la durabilidad de las uniones, particularmente en condiciones de vuelo con vibraciones constantes.



Figura 29 Impresión 3D con incrustación de tuercas en estructura

En cuanto a los sistemas electrónicos, se llevó a cabo un detallado trabajo de integración que incluyó pruebas preliminares y soldaduras precisas. Un paso importante fue la validación de la conectividad del módulo **Wi-Fi ESP32** antes de su integración definitiva. Para ello, se realizaron pruebas en una **protoboard**, verificando su capacidad para transmitir y recibir señales correctamente. Estas pruebas previas permitieron detectar y solucionar posibles inconvenientes antes de realizar la soldadura final, minimizando el riesgo de errores en el ensamblaje. El módulo **Wi-Fi ESP32**, tras las pruebas iniciales, fue soldado definitivamente, garantizando una conectividad estable y fiable con la Ground Control Station (GCS) para la transmisión de datos en tiempo real.

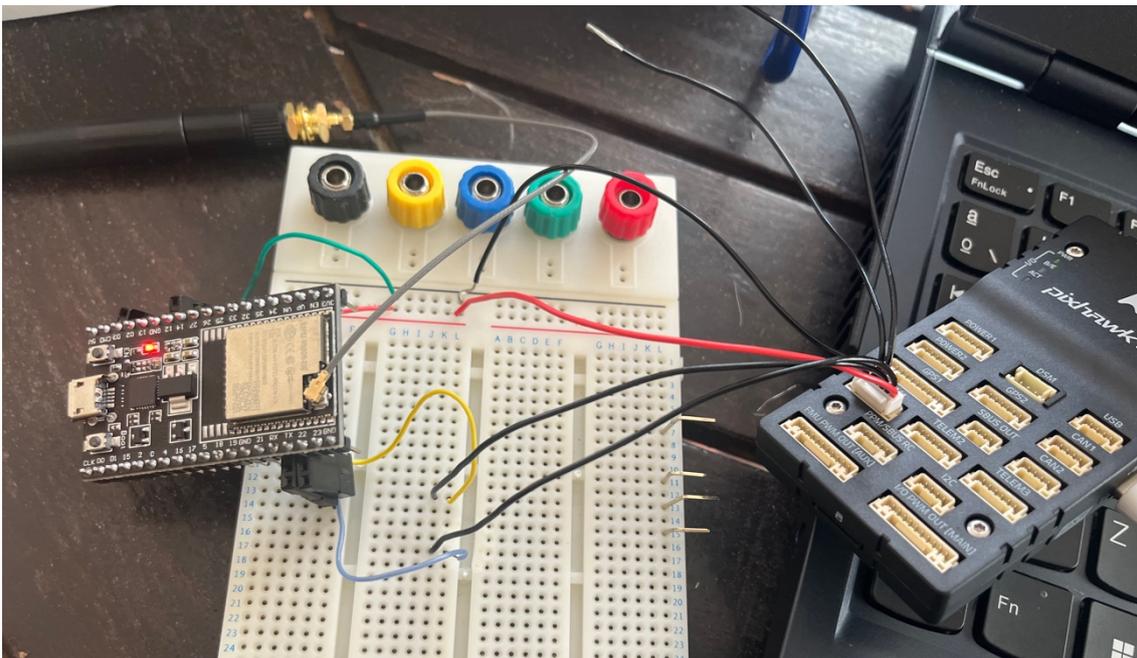


Figura 30 Protoboard test del conexionado ESP32

Una vez validadas las conexiones, se procedió a la **soldadura con estaño** de los distintos componentes electrónicos. Para soldar los **Electronic Speed Controllers (ESCs)** fueron necesarios varios ciclos de **soldadura y desoldadura** para garantizar la correcta **polarización** y el sentido de giro de los motores. Los **motores brushless** fueron soldados directamente a los ESCs, cubriendo con termoretráctil la unión, asegurando conexiones duraderas y resistentes a las vibraciones del vuelo.

Además, se integraron las conexiones hacia la **Placa de Distribución de Potencia (PDB)**, asegurando una entrega eficiente de energía desde la batería hacia todos los subsistemas del dron.

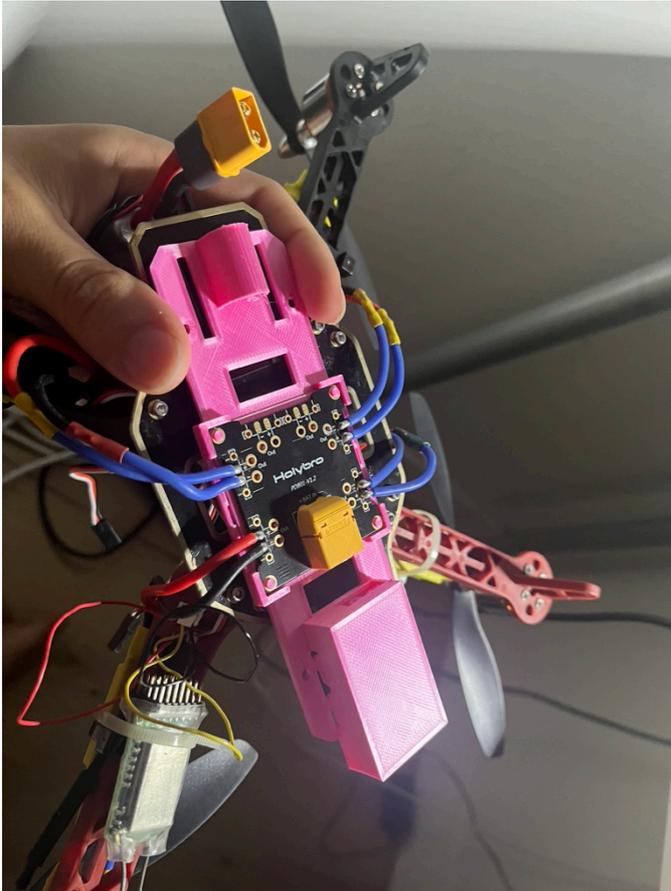


Figura 31 Ensamblaje de piezas impresas en el UAS

Otro aspecto crucial fue la protección de los componentes electrónicos durante la soldadura y el ensamblaje. Se implementó **hilo de estaño** y **flux** para evitar sobrecalentamientos y asegurar la durabilidad de las conexiones. Adicionalmente, el diseño de las piezas impresas en 3D incluyó **carcasas protectoras** para elementos sensibles como el controlador de vuelo, la radio Sik, la antena de la placa Wi-Fi entre otros, minimizando así, los riesgos de daño por golpes o vibraciones excesivas.

En resumen, el proceso de fabricación y ensamblaje del UAS ha combinado un enfoque **iterativo en el diseño estructural**, pruebas electrónicas preliminares y una

integración precisa de todos los subsistemas. Este enfoque no solo garantizó un sistema funcional, robusto y eficiente, sino que también optimizó su rendimiento para cumplir con las exigencias operativas del proyecto, preparándolo para misiones complejas y con un alto nivel de fiabilidad.

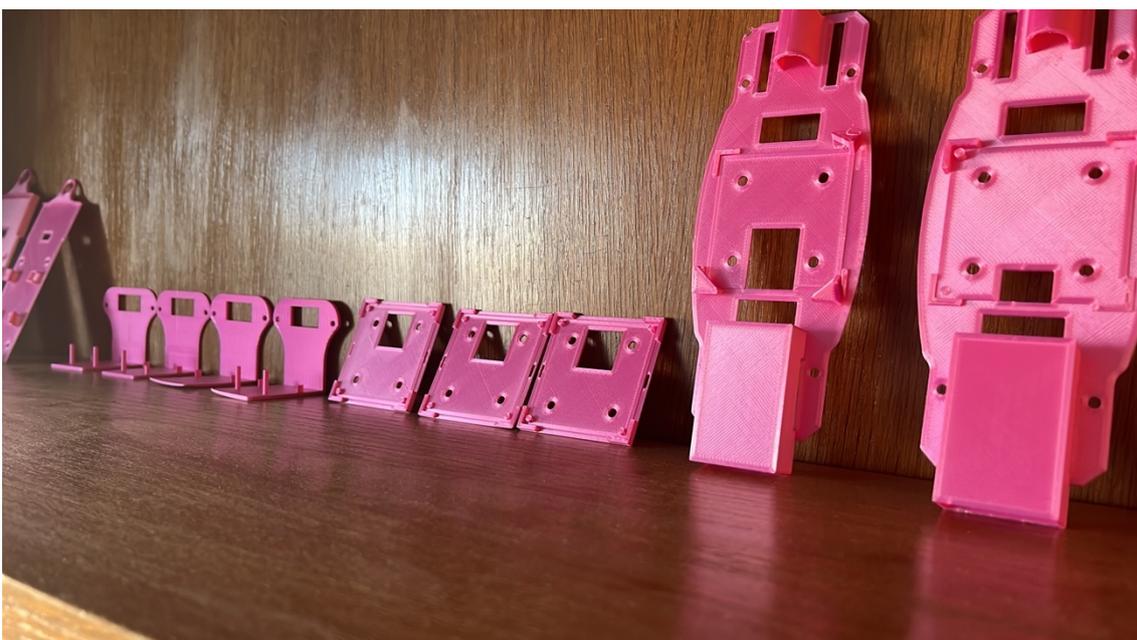


Figura 32 Prototipos impresos

3.1.2 Segmento Tierra

El segmento tierra está compuesto por los sistemas necesarios para la gestión, supervisión y comunicación del enjambre. Sus componentes principales y funcionalidades son:

- **Ground Control Station (GCS):** La GCS es el núcleo de gestión y control del sistema. Desde aquí se gestionan múltiples drones simultáneamente, permitiendo:
 - Monitorear datos en tiempo real como posición, altitud, velocidad, estado de batería y alertas.
 - Emitir comandos de control individuales o colectivos.
 - Planificar y reconfigurar misiones en tiempo real. La GCS utiliza una **interfaz gráfica intuitiva**, que facilita la operación y muestra la información crítica del enjambre, incluyendo mapas en tiempo real.
- **FTS (Flight Termination System):** Este sistema proporciona una capa adicional de seguridad y redundancia. Permite la desconexión o desactivación segura de un dron en caso de emergencia, asegurando que el enjambre pueda continuar operando sin comprometer la integridad del sistema global.
- **Router:** Es responsable de facilitar la transmisión de datos entre la GCS y la estación RTK. El router asegura una conexión estable y de baja latencia para la transferencia de correcciones RTK desde la estación base hacia los drones a través del enlace de comunicaciones.
- **Estación RTK:** La estación RTK actúa como una base que transmite correcciones diferenciales a los receptores GNSS RTK en el segmento aire. Esto mejora drásticamente la precisión del posicionamiento, eliminando errores comunes como los causados por la ionosfera o la deriva del reloj satelital. La estación RTK está conectada al router para facilitar el enlace con la GCS y, a través de esta, con los drones.

3.1.2.1 Componentes

3.1.2.1.1 Ground Control Station

La **Ground Control Station (GCS)** es el componente central del segmento tierra en la operación de un enjambre de drones. Desde la GCS, los operadores humanos supervisan y controlan en tiempo real las actividades de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), gestionando tanto la telemetría como la transmisión de datos. En el contexto de este proyecto, la GCS está compuesta por varios elementos clave que permiten la integración de los drones con el software de control y su correspondiente infraestructura de comunicaciones.

3.1.2.1.1.1 Laptop Lenovo Legion

El **Lenovo Legion 5 15ITH6H** es un portátil de alto rendimiento que sirve como la base principal de la **Ground Control Station (GCS)** para gestionar y controlar un enjambre de drones. Este equipo está diseñado para ejecutar aplicaciones exigentes como **Skybrush**, que se utiliza para planificar, monitorizar y supervisar las misiones de UAVs en tiempo real. Gracias a su capacidad de procesamiento y su configuración avanzada, el Legion 5 permite manejar de manera eficiente tareas críticas como la **visualización de datos de telemetría**, el **procesamiento de imágenes**, la **comunicación bidireccional con los drones** y la ejecución simultánea de múltiples procesos esenciales para la operación del enjambre.

Desde el punto de vista técnico, el Lenovo Legion 5 está equipado con un procesador **Intel Core i7-11800H** de **8 núcleos**, capaz de alcanzar velocidades de hasta **4.6 GHz**, lo que asegura un rendimiento fluido en tareas intensivas. Su tarjeta gráfica **NVIDIA GeForce RTX 3070** está diseñada para manejar gráficos complejos y procesar datos de alta resolución, lo que es esencial para las interfaces avanzadas y el análisis visual en tiempo real proporcionados por el software de control.

El portátil incluye **32 GB de RAM DDR4**, ofreciendo la capacidad necesaria para gestionar grandes volúmenes de datos de telemetría y ejecutar aplicaciones exigentes de manera simultánea. Su **almacenamiento SSD de 1 TB** proporciona espacio más que suficiente para registrar datos críticos y garantizar tiempos de carga rápidos en aplicaciones y misiones de UAVs.

La **pantalla de 15.6 pulgadas** con resolución **Full HD** y una **tasa de refresco de 165 Hz** asegura una visualización nítida y fluida, imprescindible para monitorizar los gráficos e interfaces del software Skybrush. Adicionalmente, el portátil cuenta con una batería de **60-80 Wh** con soporte para **Rapid Charge Pro**, lo que permite mantener operaciones prolongadas en campo sin interrupciones.

En resumen, el Lenovo Legion 5 15ITH6H combina potencia, capacidad gráfica, almacenamiento rápido y una interfaz de usuario optimizada, posicionándose como una herramienta ideal para soportar las demandas operativas de una Ground Control Station en operaciones de enjambre de drones. En este ordenador, se alberga el software necesario para poder configurar y poder operar los enjambres: QGroundControl y Skybrush.

3.1.2.1.1.1.1 Skybrush Software

El **Skybrush Software** es una plataforma integral para el control y la gestión de enjambres de drones desde la Ground Control Station. Este software permite a los operadores planificar misiones, monitorizar en tiempo real los UAVs, y enviar comandos colectivos o individuales al enjambre. Se compone de varios módulos que cubren diferentes aspectos de la operación, desde la coordinación del vuelo hasta la simulación de misiones. Este software es open-source, sin embargo, para realizar operaciones de carácter comercial, es necesario adquirir la licencia profesional que incluye el módulo sidekick. Más adelante se detalla cada uno de sus módulos y se expone el motivo por el cuál sidekick es imprescindible para poder operar enjambres.

3.1.2.1.1.1.1.1 Skybrush Server

Skybrush Server es el núcleo operativo de la infraestructura de **Skybrush**, diseñado para gestionar la comunicación y coordinación entre la **Ground Control Station (GCS)** y el enjambre de drones. Este servidor actúa como un punto central de procesamiento donde los **comandos enviados por el operador** son distribuidos eficientemente entre los UAVs, garantizando que cada dron reciba las instrucciones necesarias para su misión. Además, recopila y procesa toda la información de **telemetría** enviada por los drones, transmitiendo estos datos a los módulos de Skybrush para su análisis, supervisión y visualización en tiempo real. Esto asegura una operación coordinada y un monitoreo continuo del enjambre.

Desde un punto de vista técnico, el **Skybrush Server** está diseñado para manejar **grandes volúmenes de datos en tiempo real**, permitiendo la gestión simultánea de múltiples flujos de telemetría provenientes de los drones. Utiliza el **protocolo MAVLink 2**, un estándar ampliamente adoptado en la comunicación entre drones y sistemas de control, que garantiza un intercambio eficiente y estructurado de datos. El servidor está optimizado para **minimizar la latencia**, asegurando una rápida transmisión de comandos y datos, algo crítico en operaciones dinámicas donde la precisión y el tiempo de respuesta son esenciales.

El Skybrush Server es capaz de gestionar el control de enjambres de **hasta cientos de drones** de manera simultánea, gracias a su arquitectura escalable y robusta. Además, es compatible con **diversos sistemas operativos**, lo que proporciona una **alta flexibilidad en su despliegue**, permitiendo su uso en una variedad de entornos operativos y plataformas de hardware. En resumen, el Skybrush Server es un componente esencial que combina rendimiento, eficiencia y adaptabilidad para garantizar el éxito en operaciones complejas de enjambres de drones.

3.1.2.1.1.1.1.2 Skybrush Live

El **módulo Skybrush Live** es una herramienta avanzada de **monitoreo en tiempo real**, diseñada para proporcionar a los operadores una **vista detallada y centralizada** del estado de un enjambre de drones durante el desarrollo de misiones. Este módulo permite visualizar datos clave de **telemetría** en una interfaz gráfica intuitiva, incluyendo información como **posición, velocidad, altitud, estado de la batería** y otros parámetros críticos de cada UAV. Con esta funcionalidad, Skybrush Live facilita la **toma de decisiones rápidas** y permite a los operadores ajustar misiones en curso en función de las condiciones cambiantes o las necesidades operativas, asegurando un control total sobre el enjambre.

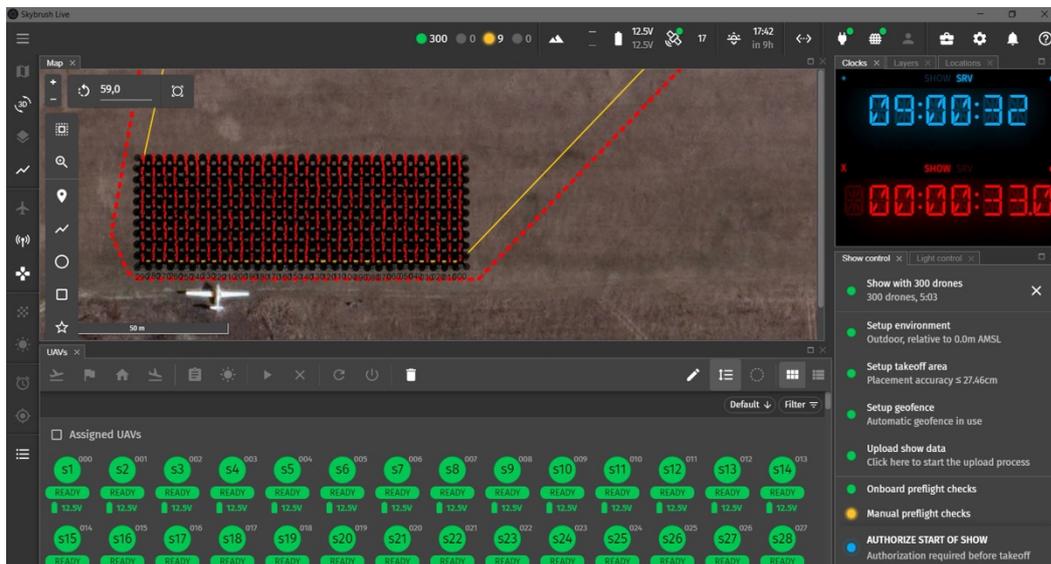


Figura 33 GUI skybrush live

Desde un punto de vista técnico, **Skybrush Live** es compatible con una amplia gama de hardware y software de control, lo que lo convierte en una solución versátil para diversas configuraciones de drones. Su capacidad de **visualización gráfica** incluye mapas en **2D y 3D**, ofreciendo una representación detallada del entorno de vuelo, con información sobre el terreno y la configuración del espacio aéreo. Este módulo puede gestionar simultáneamente la telemetría de **decenas o incluso cientos de drones**, actualizando los datos en tiempo real para garantizar que los operadores puedan reaccionar de manera inmediata ante cualquier situación.

Además, **Skybrush Live** permite superponer **múltiples capas de datos**, proporcionando información adicional sobre el entorno, como obstáculos, rutas planificadas y restricciones operativas, lo que mejora significativamente la **conciencia situacional** del operador. Esta herramienta es indispensable para la gestión de enjambres de drones en misiones complejas, ya

que combina precisión, velocidad de actualización y una interfaz gráfica de fácil uso para maximizar la eficiencia operativa.

3.1.2.1.1.1.1.3 Skybrush Studio

El **Skybrush Studio** es el módulo central encargado de la **planificación de misiones** para el enjambre de drones. Su funcionalidad principal es permitir a los operadores **diseñar trayectorias de vuelo y definir comportamientos específicos** para cada UAV, facilitando la automatización y coordinación de las misiones. Este módulo también incluye herramientas de **simulación previa**, que permiten probar y ajustar las misiones antes de su ejecución en el entorno real, reduciendo riesgos y optimizando el rendimiento general del enjambre. Estas capacidades aseguran un control detallado y confiable, esencial para operaciones críticas.

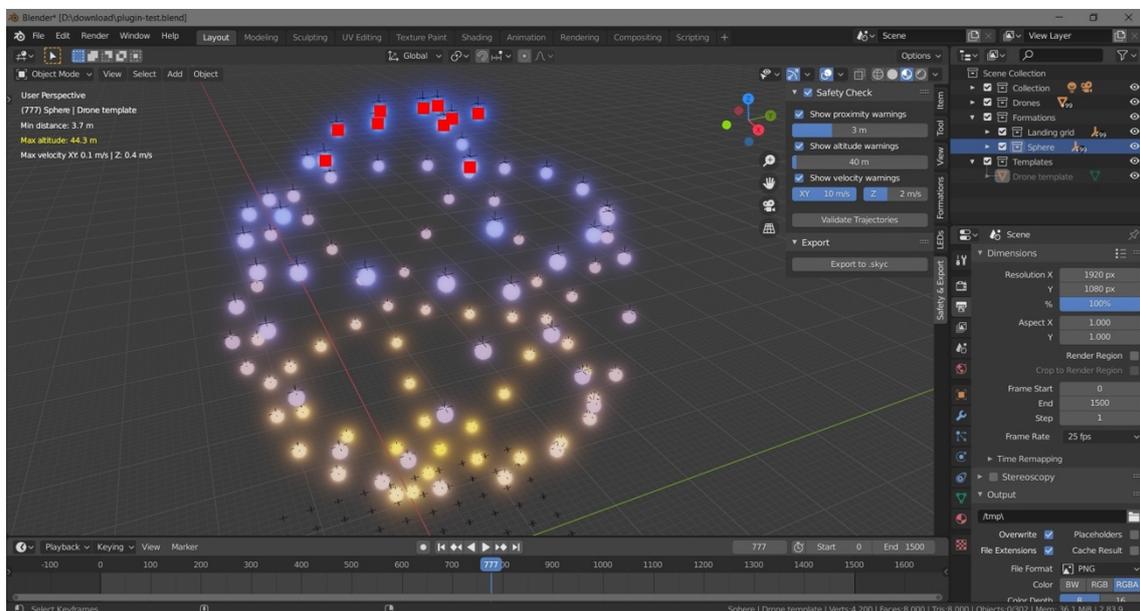


Figura 34 Skybrush studio

Desde el punto de vista técnico, el **Skybrush Studio** proporciona un entorno gráfico avanzado, donde los operadores pueden trazar rutas y planificar misiones complejas utilizando mapas en **2D y 3D**. La simulación integrada permite analizar detalladamente los **patrones de vuelo del enjambre**, ajustando automáticamente parámetros como trayectorias, alturas y velocidades según las características del **terreno** y las **condiciones operativas**. Además, este módulo es compatible con múltiples fuentes de **datos cartográficos**, lo que permite personalizar las misiones y adaptarlas a las necesidades específicas de cada operación.

El Skybrush Studio no solo facilita el diseño y simulación de misiones, sino que también integra funciones para ajustar dinámicamente las operaciones en caso de cambios en el entorno o en los objetivos de la misión. Esta flexibilidad y capacidad de personalización hacen que el Skybrush

Studio sea una herramienta esencial para la planificación y ejecución eficiente de misiones en enjambres de drones, maximizando tanto la precisión como la efectividad operativa.

3.1.2.1.1.1.2 QGroundControl

QGroundControl es un software de **código abierto** diseñado para complementar y mejorar el control de UAVs, proporcionando una **interfaz gráfica intuitiva** para planificar misiones, monitorizar telemetría y gestionar configuraciones avanzadas de los drones. Este software es particularmente útil para realizar **ajustes precisos**, verificar parámetros de vuelo y cargar misiones automatizadas, ofreciendo una flexibilidad adicional y una supervisión detallada durante las operaciones en tiempo real. Su facilidad de uso y versatilidad lo convierten en una herramienta indispensable para operadores de UAVs en una variedad de escenarios, desde aplicaciones recreativas hasta misiones profesionales.

En términos técnicos, **QGroundControl** es compatible con múltiples plataformas, incluyendo **Windows, macOS y Linux**, y utiliza el protocolo **MAVLink**, ampliamente adoptado en la industria de drones. Esto garantiza su compatibilidad con una amplia variedad de UAVs y sistemas de control. La herramienta permite la **configuración avanzada de parámetros de vuelo**, como ajustes de velocidad, altitud y comportamiento en diferentes fases de la misión. Además, proporciona un control directo del UAV, lo que facilita maniobras críticas y ajustes dinámicos en tiempo real.

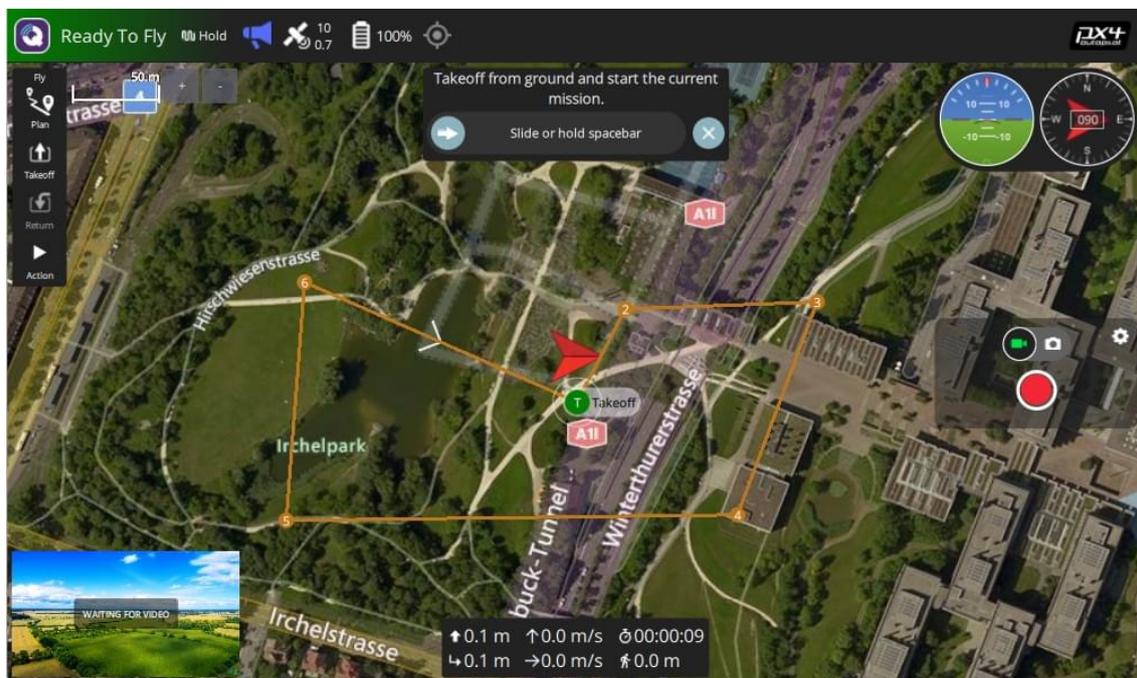


Figura 35 GUI QGroundControl

QGroundControl también soporta la **visualización gráfica de rutas** y la **monitorización de datos en tiempo real**, ofreciendo una representación clara y detallada de la posición, trayectoria y estado del UAV. Estas capacidades permiten a los operadores mantener un control completo sobre las operaciones, optimizando la planificación y ejecución de misiones con un enfoque en la precisión y eficiencia.

3.1.2.1.1.1.3 H-RTK F9P GNSS Base



Figura 36 F9P RTK GNSS Base

El **H-RTK F9P GNSS Base** de Holybro es la solución de **posicionamiento de alta precisión** diseñada para actuar como estación base en aplicaciones que requieren exactitud centimétrica. Este es el módulo que le proporciona las **correcciones diferenciales** basados en tecnología **RTK (Cinemática en Tiempo Real)**, a los receptores GNSS Rover instalados en los UAVs, reduciendo significativamente los errores de posicionamiento. Esto permite a los drones navegar de manera autónoma con una precisión extraordinaria, mejorando la fiabilidad y el rendimiento en misiones críticas. Desde una perspectiva técnica, el H-RTK F9P utiliza el **chipset u-blox ZED-F9P**, reconocido por su capacidad de soportar múltiples sistemas de navegación global, incluidos **GPS, GLONASS, Galileo** y **BeiDou**. Al recibir señales de diversas



Figura 37 Soporte imprimido en 3D para la base

constelaciones satelitales simultáneamente, el sistema aumenta la **robustez y fiabilidad** del posicionamiento, incluso en condiciones operativas adversas.

Este módulo opera en **doble frecuencia (L1 y L2)**, lo que reduce errores causados por factores atmosféricos o interferencias, garantizando datos precisos incluso en entornos con poca visibilidad satelital. Además, la estación base puede conectarse a la **Ground Control Station (GCS)** o a otros dispositivos a través de **UART, USB o I2C**, lo que proporciona una alta versatilidad para integrarse con diferentes sistemas. Gracias a estas capacidades, el H-RTK F9P GNSS Base es una herramienta esencial para asegurar la precisión y fiabilidad en misiones de alta complejidad.

3.1.2.1.1.4 WiFi Router



Figura 38 ASUS RT-AX53U router

El **Router RT-AX53U** es un enrutador de doble banda diseñado para proporcionar **conectividad inalámbrica de alta velocidad y baja latencia**, lo que lo hace ideal para configuraciones complejas como el control de **enjambres de drones**. Este dispositivo permite que múltiples UAVs se conecten simultáneamente a la red, asegurando la **transmisión en tiempo real** de datos críticos como telemetría, video y otros sensores hacia la Ground Control Station (GCS). Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y su rendimiento confiable lo convierten en una pieza clave para operaciones donde la precisión y la estabilidad de la comunicación son esenciales.

Desde el punto de vista técnico, el RT-AX53U es compatible con la tecnología **Wi-Fi 6 (802.11ax)**, que ofrece una mejora significativa en comparación con generaciones anteriores de Wi-Fi, proporcionando **mayor ancho de banda, menor latencia** y la capacidad de conectar simultáneamente un número elevado de dispositivos sin degradar el rendimiento. Este router alcanza una **velocidad combinada de hasta 1.8 Gbps**, distribuyéndose entre las bandas de **2.4 GHz y 5 GHz**, lo que garantiza una transmisión rápida y estable incluso en entornos con alta densidad de dispositivos o interferencias.

El RT-AX53U incorpora tecnologías avanzadas como **MU-MIMO** y **OFDMA**, que optimizan la asignación de canales y mejoran la eficiencia del tráfico de datos. Esto asegura que cada dron conectado reciba la calidad de servicio necesaria para la transmisión de información crítica, sin interferencias o interrupciones. Además, incluye funciones de **seguridad avanzada**, como el **AIProtection** desarrollado por Asus, que protege la red contra amenazas externas, garantizando la integridad de las comunicaciones en operaciones sensibles. En conjunto, el **Router RT-AX53U** combina **velocidad, capacidad de manejo de dispositivos y seguridad**, convirtiéndose en un componente esencial para la gestión de comunicaciones inalámbricas en misiones de enjambre de drones, donde la conectividad estable y la eficiencia del tráfico de datos son imprescindibles.

3.1.2.1.1.2 Flight Termination System

El **Flight Termination System (FTS)** es un sistema de seguridad diseñado para detener de manera inmediata y controlada el vuelo de un vehículo aéreo no tripulado (UAV), en caso de una emergencia o falla crítica. La función principal de este sistema es evitar que el vehículo cause daños a la infraestructura, a personas, o interfiera en el espacio aéreo, especialmente en situaciones donde el control del vehículo se ha perdido o existe el riesgo de que se desvíe de su ruta prevista. El FTS es una de las soluciones más importantes en el campo de la aviación no tripulada, donde la seguridad es de máxima prioridad.

El FTS cuenta con una **unidad de comando o receptor** ubicada a bordo del vehículo. Este receptor está constantemente en espera de recibir una señal de terminación desde la Ground Control Station (GCS) o desde un controlador dedicado que supervise la misión. Cuando se envía el comando, el receptor acciona los mecanismos para detener el vuelo. Este comando puede activarse manualmente por un operador humano o de manera automática, si se detectan condiciones críticas que comprometan la seguridad, como pérdida prolongada de comunicación, fallos en los sistemas de navegación o si el vehículo entra en una zona no autorizada.

En cuanto a los métodos de terminación, existen varias formas en las que un FTS puede ejecutar la finalización del vuelo, dependiendo del diseño del vehículo y la naturaleza de la misión. Uno

de los métodos más comunes es el **kill switch (aterrizaje forzoso)** del vehículo. En los drones de tipo multirrotores, el FTS puede detener los motores y dejar que el vehículo caiga en un área designada. Otro método es el **landing automático**, en este caso, el UAV realiza un aterrizaje descendiendo en la posición en la que se encuentre, pudiendo preservar en mejor estado el UAV. Finalmente, también se puede definir el **Return To Home**, esta funcionalidad, al ser ejecutada hará que el UAV vuelva a la posición definida como “casa”, normalmente suele ser su posición de despegue. Los sistemas de terminación a menudo incluyen varios modos que pueden activarse dependiendo de la naturaleza del fallo.

Este sistema, está diseñado con una alta **redundancia** para asegurar que funcionen incluso en situaciones de fallos múltiples. La redundancia es crítica en misiones de alto riesgo, donde cualquier fallo en el FTS podría tener consecuencias graves. Además, algunos FTS modernos incluyen mecanismos de **autodiagnóstico**, que monitorizan el estado del sistema en todo momento y activan la finalización automática del vuelo si se detecta una falla en el propio sistema de terminación.

Técnicamente, un FTS opera utilizando **radiofrecuencias dedicadas** o señales de satélite en casos de vehículos de gran escala. Estas señales son enviadas desde la estación de control o desde un satélite y se transmiten a través de **enlaces seguros** para evitar interferencias o sabotajes. En drones de menor tamaño, las señales suelen enviarse mediante enlaces de radio en las frecuencias de 433 MHz en Europa o 915 MHz en América del Norte, garantizando una comunicación clara y sin interferencias. Además, los FTS están diseñados para operar en entornos de interferencia electromagnética, asegurando que la señal de terminación siempre pueda ser recibida.

En términos de regulación, los **Flight Termination Systems** son requeridos en muchas jurisdicciones para operaciones críticas de UAVs, lanzamientos espaciales o pruebas de cohetes. Tanto la **FAA (Federal Aviation Administration)** en Estados Unidos como la **EASA (European Union Aviation Safety Agency)** en Europa exigen la instalación de un FTS en determinadas operaciones, especialmente aquellas que se llevan a cabo en zonas pobladas o de alta densidad de tráfico aéreo. Esto garantiza que, en caso de fallo, la operación puede ser detenida de manera segura. La autoridad competente, en España AESA, exige que el operador tenga un FTS alternativo a la GCS para poder operar este tipo de misiones. Por ello, se requiere de un ordenador adicional y una vía de comunicación alternativa a la que usa como primaria que en este diseño es la comunicación WiFi. Por ende, se deberá incorporar la comunicación radio para cubrir este requisito.

A continuación, se describen los componentes que van a formar parte del FTS del proyecto:

3.1.2.1.1.2.1 *Macbook Pro*

El **MacBook Pro 13 pulgadas (2020)** se utilizará como una herramienta de **respaldo crítico** para tareas relacionadas con el **Flight Termination System (FTS)**, proporcionando una **interfaz adicional** para la supervisión y control del sistema de terminación en caso de emergencia. Su combinación de **portabilidad, potencia de procesamiento y conectividad avanzada** lo convierte en un recurso ideal para garantizar la correcta ejecución del FTS en el enjambre de drones. Este ordenador permite a los operadores responder de manera rápida y eficiente en situaciones críticas, añadiendo un nivel adicional de **flexibilidad y seguridad** en las operaciones.

Desde el punto de vista técnico, este modelo de **MacBook Pro** está equipado con un procesador **Intel Core i5 de 10.ª generación** con **4 núcleos** y una frecuencia base de **2 GHz**, lo que le permite manejar tareas exigentes relacionadas con el monitoreo y la gestión del sistema FTS. Con **16 GB de RAM**, el portátil está preparado para realizar múltiples tareas simultáneamente, como el monitoreo de telemetría y la gestión de emergencias. Su **SSD de 512 GB** asegura tiempos de carga rápidos y suficiente almacenamiento para aplicaciones críticas y datos relacionados con la misión.

La pantalla **Retina de 2560 x 1600 píxeles** con soporte para la gama de colores **P3** ofrece una visualización clara y precisa, ideal para monitorear interfaces gráficas y mapas en alta resolución. Sus **cuatro puertos Thunderbolt 3**, que permiten transferencias de hasta **40 Gbps**, garantizan una conectividad avanzada para integrar dispositivos adicionales como monitores externos, estaciones de carga y sistemas de comunicación.

Con una batería que ofrece una duración de hasta **10 horas**, el MacBook Pro asegura un rendimiento continuo durante operaciones prolongadas en campo.

En resumen, el **MacBook Pro 13 pulgadas (2020)** combina **rendimiento portátil, conectividad avanzada y duración de batería** para actuar como una herramienta de respaldo confiable y eficiente en la gestión del **Flight Termination System**, aumentando la seguridad y la capacidad de respuesta en misiones críticas.

3.1.2.1.1.2.1.1 Skybrush Sidekick

Skybrush Sidekick es un módulo complementario diseñado para mejorar la **integración de dispositivos externos** al sistema principal de Skybrush, proporcionando una solución adicional para controlar y monitorizar el enjambre de drones de manera más **flexible y versátil**. Este módulo está pensado para aumentar la **movilidad** y la **adaptabilidad** del operador durante las misiones, permitiendo interacciones fluidas con dispositivos móviles u otros sistemas

complementarios, ya sea para supervisar la telemetría en tiempo real o para emitir comandos desde una ubicación distinta a la Ground Control Station (GCS) principal.

El **Skybrush Sidekick** puede conectarse de forma **inalámbrica** o mediante **cable** a dispositivos móviles o estaciones de control secundarias, estableciendo un **canal de comunicación adicional** entre estos dispositivos y la GCS. A través de aplicaciones específicas, los operadores pueden utilizar dispositivos móviles como tablets o smartphones para **controlar el enjambre**, monitorizar parámetros críticos o recibir **actualizaciones en tiempo real** desde ubicaciones remotas. Esto resulta especialmente útil en operaciones dinámicas, donde el operador necesita acceso constante a los datos sin depender exclusivamente de la GCS principal.

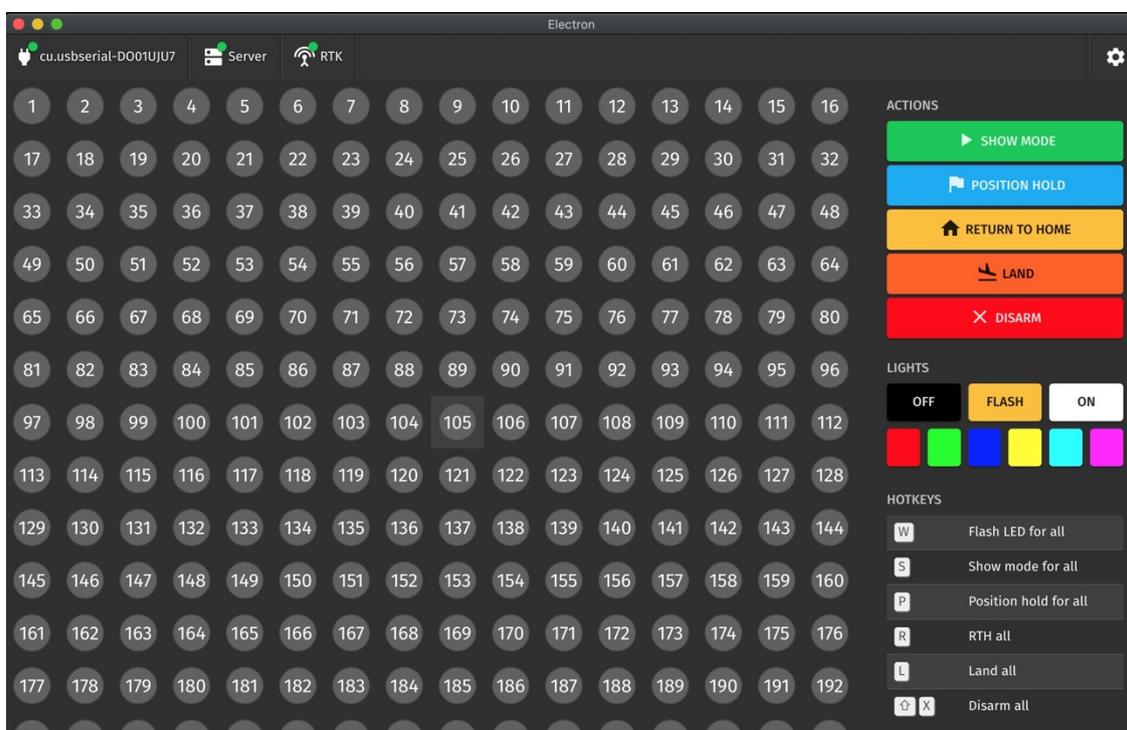


Figura 39 GUI Sidekick

Este módulo es compatible con una amplia variedad de dispositivos y sistemas, ofreciendo opciones de **integración personalizadas** que amplían significativamente la capacidad de control y supervisión del enjambre. Gracias a su diseño flexible, el **Skybrush Sidekick** permite a los equipos operativos trabajar con una mayor eficiencia, adaptándose a diferentes escenarios y requerimientos operativos.

3.1.2.1.1.2.2 SiK Telemetry radio



Figura 40 Sik Radio

La **SiK Radio**, ya descrita en el segmento aire, se **integrará al Flight Termination System** como el enlace principal para transmitir el comando de terminación de vuelo a todos los UAVs que estén operando en el enjambre. Este sistema se basa en una **única antena instalada en el FTS**, que será responsable de enviar el comando de terminación de manera simultánea a todas las antenas receptoras instaladas en los drones en vuelo.

Este diseño centralizado garantiza que una sola transmisión desde la SiK Radio sea capaz de alcanzar a todos los UAVs del enjambre, asegurando una respuesta inmediata y coordinada en caso de activación del sistema de terminación. La capacidad de gestionar esta comunicación crítica desde una sola antena reduce la complejidad del sistema y refuerza la fiabilidad en situaciones de emergencia.

3.1.2.2 Sistema de Comunicaciones

El sistema de comunicaciones conecta el segmento aire con el segmento tierra, asegurando un flujo de datos eficiente y seguro. Este sistema es fundamental para garantizar el control, la supervisión y la sincronización del enjambre. Los principales flujos de información y sus direcciones son:

- **Sik Radio:** El enlace principal para la comunicación entre la GCS y los drones. Este canal transmite comandos críticos desde la GCS hacia los drones (como Kill Switch, Land, y Return to Home) y recibe telemetría en tiempo real desde los drones, incluyendo datos como latitud/longitud, altitud, velocidad, estado de batería y alertas. Este flujo de datos es bidireccional y se caracteriza por ser robusto y de largo alcance.
- **Wi-Fi ESP32:** Este enlace es utilizado para comunicaciones de corto alcance, ya sea entre drones o entre drones y la GCS en entornos cercanos. Es ideal para transmitir datos que requieran baja latencia, como la sincronización de trayectorias o actualizaciones rápidas de parámetros operativos.
- **Correcciones RTK:** La estación RTK envía correcciones diferenciales al módulo GNSS RTK de cada dron a través del sistema de comunicaciones. Este flujo es unidireccional, desde la estación RTK en el segmento tierra hacia los drones en el segmento aire, y es esencial para garantizar la precisión centimétrica requerida.
- **Enlace de Seguridad:** Los comandos de seguridad, como el Kill Switch o el Return to Home, fluyen desde la GCS hacia los drones a través del Sik Radio. Estos comandos son prioritarios y diseñados para tener baja latencia, asegurando respuestas rápidas en situaciones críticas.

3.1.2.2.1 Comunicaciones en la Ground Control Station (GCS)

El sistema de comunicación entre la **Ground Control Station (GCS)** y los drones es un proceso complejo que combina múltiples tecnologías para asegurar un control y supervisión en tiempo real del enjambre. El sistema se basa principalmente en una conexión inalámbrica **Wi-Fi** proporcionada por un **router** en la GCS, que actúa como el centro de enlace entre los drones y la estación de control. En este caso, el router utilizado es un **Asus RT-AX53U**, que soporta Wi-Fi de alta velocidad, necesario para manejar múltiples conexiones simultáneas y garantizar que la transmisión de datos de telemetría y correcciones sea rápida y sin interrupciones.

Cada dron en el enjambre está equipado con un **ESP32**, un microcontrolador que integra capacidades de Wi-Fi, permitiendo la conexión directa a la red creada por el router en la GCS. El **ESP32-WROOM-32U** es especialmente adecuado para esta tarea gracias a su capacidad para

manejar conexiones de alta velocidad y baja latencia, así como su compatibilidad con el estándar **802.11 b/g/n**, lo que lo hace ideal para entornos donde se necesita transmisión de datos eficiente en tiempo real.

Un componente clave en esta configuración es el uso de **DroneBridge32**, una herramienta que actúa como puente entre la comunicación **UART** interna de los drones y la red Wi-Fi externa. Los sistemas internos de los drones, como el controlador de vuelo, utilizan la interfaz **UART** para comunicar datos de telemetría y recibir comandos. El **UART** (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) es un sistema de comunicación serial que envía y recibe datos de manera asíncrona, sin la necesidad de una señal de reloj compartida. Esto simplifica la transmisión de datos, pero requiere que se convierta en un formato adecuado para la transmisión a través de Wi-Fi, y aquí es donde entra **DroneBridge32**. Esta herramienta traduce los datos UART de los drones a paquetes que pueden ser enviados a través de Wi-Fi, manteniendo la integridad de la comunicación y la eficiencia.

Una vez que se establece la conexión entre la GCS y los drones a través de la red Wi-Fi, el **protocolo MAVLink** es el encargado de la transmisión de los datos. MAVLink (Micro Air Vehicle Link) es un protocolo ligero y eficiente que se usa comúnmente en aplicaciones de UAS. Su principal ventaja es que permite la **bidireccionalidad** en la comunicación: los drones envían datos de telemetría a la GCS, como la posición, la velocidad, la altitud, el estado de los sistemas, etc., y la GCS puede enviar comandos de control y ajustes al dron. **MAVLink** también permite la gestión de grandes enjambres de drones, ya que es compatible con una estructura de paquetes binarios ligeros y es eficiente en términos de ancho de banda, minimizando la latencia.

3.1.2.2.1.1 Mavlink protocol

MAVLink (Micro Air Vehicle Link) es un protocolo de comunicación **serial** diseñado específicamente para la transmisión de datos entre vehículos aéreos no tripulados (UAS) y estaciones de control en tierra (GCS). Este protocolo se basa en **comunicación UART** (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), un tipo de comunicación serie que se utiliza ampliamente en sistemas embebidos. La comunicación UART permite la transmisión de datos en un formato de bits de manera asíncrona, lo que significa que no se requiere una señal de reloj entre los dispositivos de comunicación. Los dispositivos que utilizan UART envían y reciben datos a través de líneas TX (transmisión) y RX (recepción), utilizando un formato de bits estándar que incluye bits de inicio y parada para marcar los datos.

En el contexto de MAVLink, la **comunicación UART** se utiliza típicamente con **baudrates** que varían entre **57600 bps** y **115200 bps**, aunque el protocolo es adaptable a diferentes velocidades.

Esto asegura una transmisión rápida de datos de telemetría y comandos de control, lo que es crucial en aplicaciones de drones donde la respuesta en tiempo real es esencial. MAVLink está diseñado para ser liviano, con paquetes binarios que generalmente no exceden los **255 bytes**, lo que lo convierte en un protocolo muy eficiente para la transmisión de datos de control, posición y estado de los drones.

Una de las principales ventajas de MAVLink es su **baja latencia** y su capacidad para trabajar en entornos con limitaciones de ancho de banda, como es típico en enlaces UART. Esto permite que los drones reciban y respondan a comandos en tiempo real, lo que es vital para misiones de vuelo autónomas o semiautónomas. Además, el protocolo cuenta con **mecanismos de verificación de errores**, como **CRC (Cyclic Redundancy Check)**, que garantizan la integridad de los datos transmitidos, reduciendo las posibilidades de errores en la comunicación.

Por otro lado, una desventaja de MAVLink es que no está diseñado para transmitir grandes volúmenes de datos, como video en alta resolución o archivos multimedia, lo que limita su uso a datos de control y telemetría. Además, debido a su estructura de paquete limitada, su capacidad de transmisión de datos puede verse restringida cuando se intenta enviar grandes cantidades de información simultáneamente.

En resumen, MAVLink es un protocolo serial eficiente, optimizado para comunicaciones de baja latencia sobre enlaces UART. Es ideal para la transmisión de comandos y datos de telemetría en tiempo real entre UAVs y estaciones de control, pero tiene limitaciones cuando se trata de manejar grandes volúmenes de datos o aplicaciones que requieren transmisión multimedia.

3.1.2.2.1.2 Correcciones RTK

Una parte esencial de este sistema de comunicación es la transmisión de **correcciones RTK** (Real-Time Kinematic). La GCS recibe estas correcciones de una **estación base RTK**. Este sistema de posicionamiento mejora la precisión del GPS al proporcionar correcciones diferenciales. Sin embargo, es importante destacar que las **correcciones RTK no ajustan directamente la posición de cada dron**, sino que corrigen la **posición calculada de la estación base**. La estación RTK compara la señal recibida de los satélites GNSS con su posición conocida y fija, y calcula las correcciones que luego se transmiten a la GCS. A su vez, la GCS envía estas correcciones a los drones, permitiendo que cada uno de ellos ajuste su propia posición basándose en esas correcciones. Esto proporciona una precisión en la ubicación que puede llegar a ser de **centímetros**, lo cual es crucial en aplicaciones donde la precisión es vital, como en misiones de vuelo autónomo o enjambres de drones que requieren un control preciso de su trayectoria.

La **GCS** utiliza MAVLink para transmitir estas correcciones RTK a los drones junto con los comandos de control. A medida que los drones reciben estas correcciones, ajustan su posicionamiento en tiempo real, mejorando la precisión de su navegación y asegurando que mantengan la posición correcta en el espacio aéreo.

3.1.2.2.1.3 Telemetría y control

El intercambio de datos entre la **GCS** y los drones es un flujo bidireccional continuo. Los drones envían datos de telemetría a la GCS en intervalos regulares, permitiendo que los operadores monitoreen en tiempo real el estado de los UAVs, como su posición, altitud, velocidad y otros parámetros críticos. Estos datos son procesados por el software de la GCS, como **Skybrush**, y se presentan en una interfaz visual que facilita el control y la toma de decisiones por parte de los operadores. Al mismo tiempo, la GCS envía comandos de control y ajustes de vuelo, que los drones ejecutan casi instantáneamente, gracias a la baja latencia proporcionada por MAVLink y la red Wi-Fi.

3.1.2.2.2 Comunicación del Flight Termination System (FTS)

El **Flight Termination System (FTS)** es una parte crucial del sistema de seguridad y solo se activa en situaciones de emergencia, cuando la **comunicación Wi-Fi falla** o se pierde el control regular de los drones. A diferencia de la GCS, el FTS no recibe datos de telemetría de los drones. Su única función es enviar comandos de emergencia a todos los UAVs para detener de inmediato el vuelo, evitando que los drones continúen operando de manera descontrolada y representen un riesgo para la seguridad.

El FTS se comunica utilizando una **frecuencia de 433 MHz**, que es conocida por su **larga distancia de transmisión y alta fiabilidad** en condiciones de interferencia. Esta comunicación se realiza mediante un esquema de **multicast**, lo que significa que un solo comando puede ser transmitido simultáneamente a todos los drones. Este enfoque asegura que todos los UAVs reciban la orden de terminación de vuelo al mismo tiempo, minimizando el tiempo de respuesta en situaciones críticas. La frecuencia de 433 MHz es utilizada porque es menos susceptible a las interferencias que la banda Wi-Fi, lo que garantiza que el comando de emergencia pueda ser recibido incluso si la red Wi-Fi de la GCS ha fallado.

El sistema FTS puede emitir diferentes comandos de emergencia, como detener los motores o ejecutar un aterrizaje inmediato, dependiendo de la situación. Estos comandos son simples, pero están diseñados para ser altamente efectivos y ejecutarse sin demora. Dado que el FTS no requiere recibir datos de los drones, su arquitectura es **unidireccional** y está optimizada para una respuesta rápida.

3.1.2.2.3 Integración del sistema

El sistema de comunicación en su totalidad es altamente **redundante** y está diseñado para proporcionar tanto el control detallado como las salvaguardias necesarias en caso de una falla. En condiciones normales, la GCS utiliza la red Wi-Fi y el protocolo MAVLink para gestionar la operación del enjambre, asegurando que los drones puedan volar de manera precisa y recibir las correcciones RTK necesarias para una navegación óptima. La GCS actúa como el centro de comando y recibe telemetría en tiempo real para monitorear el estado de los drones.

Sin embargo, en caso de una falla en la comunicación Wi-Fi o una situación de emergencia, el **FTS** asume el control y emite un comando multicast a todos los drones, asegurando la **finalización inmediata y controlada del vuelo**. Esta redundancia entre el sistema Wi-Fi y el FTS garantiza que siempre haya una manera segura de detener el vuelo de los drones, protegiendo tanto el entorno como los propios UAVs.

Este sistema, que integra **comunicaciones Wi-Fi, MAVLink, RTK y FTS**, ofrece una solución completa para el control y la seguridad de enjambres de drones, asegurando que tanto la operación en tiempo real como las medidas de emergencia estén cubiertas de manera eficaz.



Figura 41 UAS Ensamblado

4. Prueba de vuelo del prototipo

4.1 Objetivo de la prueba de vuelo

El objetivo de esta prueba es validar la capacidad del UAV para realizar un vuelo **vertical** autónomo hasta una altura de **3 metros sobre el suelo**, manteniendo su posición con precisión y descendiendo de manera controlada al **mismo punto de despegue**. Este ensayo busca evaluar el desempeño del sistema en tareas básicas de estabilidad y precisión posicional, siendo estas habilidades esenciales para operaciones de enjambre más avanzadas. Además, se analiza cómo el sistema realiza **correcciones de posición** en el aire, lo que permitirá validar la funcionalidad de la tecnología de navegación GNSS RTK y los algoritmos de control implementados.

4.2 Análisis del ensayo a realizar

La prueba se lleva a cabo en un entorno controlado: un **jardín abierto** con espacio suficiente para minimizar riesgos y evitar daños materiales. Este espacio permite que el UAV opere sin obstáculos cercanos, lo que garantiza que los resultados del ensayo reflejen el desempeño intrínseco del sistema bajo condiciones ideales.

4.2.1 Medidas de seguridad

Para garantizar la seguridad durante la prueba, se han implementado las siguientes medidas:

1. **Restricción física mediante cuerda:** El UAV está atado a una **cuerda de seguridad** que limita su rango de movimiento en caso de pérdida de control. Esto previene despegues descontrolados y asegura que el dron permanezca dentro del área segura.
2. **Volumen operacional definido:** Se programa un volumen operacional virtual en el software de la GCS. Este volumen establece límites dentro de los cuales el UAV puede operar. Si el dron intenta salir de estos límites, se activa un **modo de emergencia**, aterrizando automáticamente para evitar riesgos adicionales.

4.2.2 Preparativos previos al vuelo

Antes de iniciar el vuelo, se realizan las siguientes comprobaciones para asegurar que las condiciones son óptimas:

1. **Estado de la batería:** Se verifica que la batería del UAV está completamente cargada y en buen estado para soportar el ensayo completo.
2. **Conexión de componentes:** Se confirma que todos los sistemas electrónicos, incluidos el GNSS RTK, los ESCs y la GCS, están correctamente conectados y operativos.

3. **Precisión GNSS:** Se espera hasta que el sistema GNSS RTK alcance una **precisión centimétrica** en el posicionamiento, una condición indispensable para garantizar la estabilidad y precisión durante el vuelo.
4. **Inspección visual del UAV:** Se realiza una inspección general para verificar que todas las piezas están correctamente ensambladas y que no hay daños visibles que puedan afectar el rendimiento.

4.2.3 Especificación del test case

Step	Acción	Resultado Esperado
1	Preparar el entorno de vuelo: seleccionar un jardín amplio y despejado.	Área operacional definida, sin obstáculos, con espacio suficiente para realizar el vuelo seguro.
2	Inspeccionar el UAV: verificar el estado físico del dron, motores, hélices y estructura.	El UAV está en condiciones óptimas para volar, sin daños visibles en su estructura o componentes.
3	Conectar la Ground Control Station (GCS) con el UAV.	La GCS establece comunicación con el UAV y carga la misión de vuelo programada.
4	Configurar el volumen operacional en la GCS.	Los límites del espacio de vuelo quedan establecidos, activando las medidas de seguridad ante salidas.
5	Verificar el sistema GNSS RTK para asegurar precisión centimétrica.	El sistema GNSS alcanza precisión centimétrica, proporcionando estabilidad posicional al UAV.
6	Comprobar el estado de la batería del UAV.	La batería está completamente cargada y lista para soportar el vuelo completo.
7	Fijar la cuerda de seguridad al dron.	La cuerda está correctamente sujeta, limitando el rango de movimiento del UAV para prevenir descontrol.
8	Encender el UAV y realizar un chequeo inicial de los sistemas electrónicos.	Todos los sistemas electrónicos, incluidos ESCs y sensores, funcionan correctamente.
9	Ejecutar el comando de despegue desde la GCS.	El UAV inicia un despegue vertical controlado y asciende hasta los 3 metros de altura programados.
10	Supervisar el comportamiento del dron durante el vuelo.	El UAV permanece estable en el aire, realizando correcciones de posición según sea necesario.
11	Asegurar que el UAV no exceda los límites del volumen operacional.	El UAV se mantiene dentro del volumen operacional definido.
12	Iniciar la fase de descenso desde la GCS.	El UAV desciende de manera controlada hasta aterrizar en el punto de despegue.
13	Descargar y analizar los datos de telemetría registrados durante el vuelo.	Los datos de telemetría muestran estabilidad, precisión y correcciones durante las fases de vuelo.
14	Evaluar el rendimiento general del sistema en función del comportamiento observado.	El sistema cumple con los objetivos de la prueba, validando su funcionalidad y preparación para misiones.

4.3 Resultado de la Prueba

El ensayo resultó **satisfactorio**, cumpliendo con los objetivos establecidos. El UAV realizó un **ascenso vertical controlado** hasta los **3 metros de altura** y se mantuvo estable en el aire durante el tiempo programado. Durante esta fase, se observaron las **correcciones de posición** realizadas por el sistema, lo que evidencia el funcionamiento adecuado del GNSS RTK y del controlador de vuelo.

Posteriormente, el dron inició el descenso de manera controlada y aterrizó con precisión en el **mismo punto de despegue**, validando la capacidad del sistema para ejecutar maniobras autónomas básicas con éxito. El uso de medidas de seguridad, como la cuerda restrictiva y el volumen operacional, proporcionó un entorno seguro para el ensayo, y no se presentaron incidencias durante el desarrollo de la prueba.

Esta prueba confirma que el sistema implementado es **funcional**, estable y preciso, demostrando que está preparado para avanzar hacia ensayos más complejos en el contexto de operaciones de enjambre. La información obtenida en este ensayo será clave para afinar y optimizar futuros vuelos del prototipo.



Figura 42 Despegue, vuelo y aterrizaje

5. Budget

A continuación, se presenta el desembolso invertido para el desarrollo del proyecto. Es importante recalcar, que algunos de los componentes hardware como baterías, ordenadores, entre otros, no se han adquirido pues ya se tenían en posesión. Por ende, en este desglose, únicamente se lista el hardware que se ha comprado específicamente para el proyecto.

Segmento Aire

Tabla 4 Desembolso segmento aire

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	SUBTOTAL (€)
FRAME 330	9,24	1	9,24
SiK Telemetry Radio V3	57,39	1	57,39
Pixhawk 6C (Plastic, PM02)	143,96	1	143,96
H-RTK F9P Rover	270,61	1	270,61
Power Distribution Board (PDB)	4,18	1	4,18
8045 Prop	1,64	2	3,28
ESP32 WIFI	6,79	1	6,79
Motor + ESC 2210 1400KV 30A	42,56	2	85,12
Vibration Absorber	9,39	2	18,64
PLA Transparente	22,06	1	22,06
TOTAL			621,27

Segmento Tierra

Tabla 5 Desembolso segmento tierra

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	SUBTOTAL (€)
H-RTK F9P BASE	297,03	1	297,03
Router - ASUS RT-AX53U	66,99	1	66,99
TOTAL			364,02

Otros gastos

Tabla 6 Desembolso de otros gastos

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	SUBTOTAL (€)
Gasto de envío	54,55	1	54,55
Soldador de estaño	23,90	1	23,90
Flux	8,30	1	8,30
Hilo de estaño	7,90	1	7,90
Gasolina	25,00	1	25,00
Spare (bridas, tornillos, etc)	15,00	1	15,00
TOTAL			134,65

El coste del hardware adquirido para el proyecto asciende a los **1.119,94 €**. Si tuviéramos en cuenta el hardware no incluido en esta lista como pueden ser los dos ordenadores, uno para la GCS y el otro para el FTS, las baterías, *spares* entre otros, el coste del proyecto ascendería a unos 5.000€

6. Marco normativo y regulatorio

6.1 Introducción a la Normativa europea y española

El creciente uso de drones en Europa ha hecho indispensable la implementación de un marco regulatorio sólido, diseñado para atender las diversas aplicaciones de estas aeronaves no tripuladas. Con el propósito de garantizar la seguridad tanto en el espacio aéreo como en tierra, la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) ha desarrollado normativas específicas, siguiendo la regulación europea, que regulan las operaciones con drones en función del nivel de riesgo asociado. En ella, se establecen los requisitos y limitaciones específicas que tiene cada categoría. Para los operadores de drones, es crucial identificar a qué categoría pertenece su operación, ya que de esto dependerá la necesidad de autorizaciones, formación y otros requisitos técnicos. Estas disposiciones, contenidas principalmente en el Reglamento (UE) 2019/947, clasifican las operaciones en tres categorías principales: **abierta, específica y certificada**.

6.2 Análisis de las categorías

6.2.1 Categoría Abierta

La **Categoría Abierta** está destinada a operaciones de bajo riesgo y no requiere autorización previa para volar, siempre que se cumplan todas las condiciones establecidas. Dentro de esta categoría, los drones están limitados a un peso máximo de 25 kg y deben operarse manteniendo una **línea de vista visual (VLOS)** en todo momento. Además, se impone un límite de altitud de vuelo de 120 metros sobre el nivel del suelo. La **Categoría Abierta** se divide en tres subcategorías: **A1, A2 y A3**, las cuales imponen diferentes restricciones según el tipo de dron y el entorno operativo.

6.2.1.1 Subcategoría A1

La subcategoría **A1** permite volar drones pequeños y ligeros sobre personas no involucradas en la operación, aunque está prohibido sobrevolar grupos de personas. Los drones aptos para volar en esta subcategoría deben estar clasificados como **C0** (menos de 250 g) o **C1** (menos de 900 g). Los drones de clase **C0** pueden volar en áreas urbanas y sobre personas, mientras que los drones **C1** solo pueden operar en áreas urbanas sin sobrevolar intencionadamente a personas.

6.2.1.2 Subcategoría A2

La subcategoría **A2** permite volar drones de hasta 4 kg en áreas urbanas, pero requiere mantener una distancia mínima de seguridad de 30 metros con respecto a personas no involucradas. Esta distancia puede reducirse a 5 metros si se utiliza el modo de baja velocidad del dron. Los drones aptos para la subcategoría A2 deben tener una etiqueta de clase **C2**, lo que asegura que cumplen con los requisitos técnicos y de seguridad necesarios para operar en entornos más controlados.

6.2.1.3 Subcategoría A3

La subcategoría **A3** está diseñada para drones más grandes, de hasta 25 kg, y exige que las operaciones se realicen en áreas despobladas, lejos de personas y propiedades. Los drones que pertenecen a las clases **C2**, **C3** y **C4** pueden volar en esta subcategoría, pero siempre deben mantener una distancia mínima de 150 metros de áreas residenciales, comerciales o industriales. Este tipo de operación está orientada a entornos rurales o industriales donde el riesgo para terceros es bajo.

6.2.2 Categoría específica

A diferencia de la **Categoría Específica**, las operaciones en la **Categoría Específica** presentan un mayor riesgo y, por lo tanto, requieren una **autorización previa** de la autoridad de aviación civil. Esta categoría está diseñada para vuelos que no cumplen con los requisitos de la **Categoría Abierta** debido a la complejidad o el riesgo de la operación, como vuelos más allá de la línea de vista visual (**BVLOS**) o vuelos sobre áreas pobladas.

Para operar en la **Categoría Específica**, los operadores deben elegir uno de los siguientes enfoques para obtener la autorización:

1. **Escenarios Estándar (STS)**: Los escenarios estándar son operaciones predefinidas aprobadas por la EASA. Si la operación se ajusta a uno de estos escenarios, el operador solo debe presentar una declaración a la autoridad nacional, sin necesidad de realizar una evaluación de riesgos personalizada.
2. **Predefined Risk Assessment (PDRA)**: Si la operación no está cubierta por un STS, se puede optar por un **PDRA**, que es una evaluación de riesgo predefinida para operaciones comunes que involucran un riesgo medio.

3. **Specific Operations Risk Assessment (SORA):** Cuando la operación no está cubierta ni por un STS ni por un PDRA, es necesario realizar un **SORA**, que es una evaluación de riesgos más detallada y adaptada a las características específicas de la operación.
4. **Light UAS Operator Certificate (LUC):** Este certificado permite a los operadores realizar sus propias evaluaciones de riesgos y autorizar operaciones sin necesidad de solicitar la autorización para cada vuelo a la autoridad competente.

En el marco de este proyecto, nos encontraríamos **bajo el paraguas de SORA**, pues el vuelo en enjambre no se considera bajo un escenario estándar ni tampoco bajo una PDRA. Sin embargo, sabemos que EASA está considerando incluir como PDRA la operación de enjambres por lo que es cuestión de tiempo que pase de ser SORA a PDRA, agilizando notablemente el proceso de solicitud para operaciones de esta índole.

JARUS Ref	UAS Charact.	Main Ops characteristics	Typical Operation
PDRA-05	Max dim 3m	<ul style="list-style-type: none"> • BVLOS; • over sparsely populated area; • in airspace where at least 50% of manned a/c can be detected, less than 120m AGL 	All range of ops
PDRA-06	Max dim 8m	<ul style="list-style-type: none"> • VLOS; • Over controlled ground area; • in airspace where at least 50% of manned a/c can be detected, less than 120m AGL 	Testing of prototype UAS
PDRA-07	Max dim 3m	<ul style="list-style-type: none"> • BVLOS; • Over controlled ground area; • Airport environment 	Airport/runway inspections
PDRA-08	Max dim 1m	<ul style="list-style-type: none"> • VLOS with Airspace Observers; • Over controlled ground area; • Segregated airspace; 	Swarming

Figura 43 PDRA vigentes y futuras en evaluación

6.2.2.1 Autorización Operacional para operaciones tipo SORA

La obtención de una autorización operacional para un enjambre de drones en la **categoría específica**, en escenarios no cubiertos por los escenarios estándares europeos STS o los PDRA (Predefined Risk Assessment), es un proceso exhaustivo y riguroso. A continuación, se describe en detalle todo el procedimiento, los documentos necesarios, y las medidas de seguridad y operativas que deben implementarse.

La **evaluación de riesgos SORA** (Specific Operations Risk Assessment) es un elemento crucial en la solicitud de la autorización para escenarios no predefinidos. AESA requiere que cada operador de drones realice una evaluación detallada de los riesgos inherentes a la operación y establezca estrategias de mitigación claras. El SORA se basa en una evaluación del riesgo tanto **aéreo** como **terrestre** y debe demostrar que la operación no afectará la seguridad pública ni las infraestructuras críticas estableciendo medidas de mitigación que deben implementarse para reducir los riesgos a niveles aceptables. Al final del proceso, se obtiene un valor **SAIL (Specific Assurance Integrity Level)**, que clasifica el nivel de riesgo de la operación, desde bajo (SAIL I y II) hasta alto (SAIL V y VI). Dependiendo del nivel de SAIL, se determinarán los requisitos de seguridad adicionales que deben implementarse.

El **proceso SORA** involucra los siguientes pasos:

1. **Definición del entorno operativo:** Identificación del espacio aéreo donde se operarán los drones. Esto incluye determinar si la operación se realizará sobre zonas urbanas, rurales o cercanas a infraestructuras críticas. Además, se identifican las áreas de sobrevuelo y aterrizaje.
2. **Evaluación del riesgo aéreo:** Se considera la posibilidad de una colisión entre los drones del enjambre o con otras aeronaves. El riesgo aumenta si el vuelo se realiza en espacios aéreos congestionados, cerca de aeropuertos o en zonas donde el tráfico aéreo es denso.
3. **Evaluación del riesgo terrestre:** Este análisis considera el impacto potencial que una falla del sistema (como la pérdida de control del enjambre) podría tener en personas y bienes en tierra. Se evalúa si la operación transcurre sobre áreas densamente pobladas y la capacidad de mitigar el riesgo en caso de emergencia.
4. **Mitigación del riesgo:** A lo largo del proceso SORA, el operador debe proponer estrategias para minimizar el riesgo a niveles aceptables. Estas estrategias pueden incluir la limitación de las áreas de vuelo, el uso de sistemas de detección y evitación (DAA), y el empleo de procedimientos de emergencia para el aterrizaje seguro de los drones en caso de pérdida de comunicación.

5. **Resultado del SORA:** Al final del proceso, el riesgo residual se clasifica en niveles que van desde bajo hasta alto. AESA solo emitirá la autorización si el riesgo residual es aceptable, y las medidas de mitigación son consideradas suficientes para garantizar la seguridad de la operación.

6.2.2.2 Documentación a presentar

La presentación de una solicitud para una autorización operacional requiere un conjunto detallado de documentos. Estos documentos están diseñados para demostrar que el operador tiene el conocimiento, la infraestructura y los procedimientos adecuados para realizar la operación de forma segura.



Guía para la presentación de una solicitud de autorización (Art. 5 Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 de mayo de 2019)

Figura 44 Guía AESA para la solicitud de la autorización

6.2.2.2.1 Manual de Operaciones (OM)

El **Manual de Operaciones** es un documento fundamental que describe los procedimientos que se seguirán durante la operación del dron. Incluye las fases del vuelo, los procedimientos de emergencia, y las responsabilidades del personal involucrado. Este manual es necesario para garantizar que la operación se realice de manera segura y eficiente, y debe ser aprobado por la autoridad competente.

El **Manual de Operaciones** es una guía detallada que incluye todos los procedimientos que seguirán los operadores para gestionar el vuelo del enjambre. Algunos de los elementos que deben incluirse son:

- **Procedimientos de vuelo normales:** Instrucciones para la gestión del despegue, vuelo y aterrizaje. Dado que se trata de un enjambre de drones, también se deben incluir los procedimientos para la coordinación y control simultáneo de múltiples UAV.
- **Gestión de emergencias:** Procedimientos detallados para situaciones de emergencia, como la pérdida de conexión con uno o varios drones, mal funcionamiento de los sistemas de control, o condiciones meteorológicas adversas.
- **Formación del personal:** Detalle de las certificaciones y formación que debe tener el personal encargado de la operación. En particular, la gestión de enjambres de drones requiere de operadores con formación avanzada en sistemas de control y automatización.

6.2.2.2.2 Manual de mantenimiento

El **Manual de Mantenimiento** garantiza que los drones se mantendrán en condiciones óptimas durante toda la operación. Este manual debe incluir:

1. **Inspecciones antes y después del vuelo:** Listas de verificación para garantizar que los drones están en condiciones operativas seguras antes de cada vuelo.
2. **Cronograma de mantenimiento preventivo:** Fechas y procedimientos para la revisión de sistemas clave, como motores, sistemas de propulsión y sistemas de comunicación.
3. **Procedimientos correctivos:** Instrucciones para gestionar reparaciones y sustituciones de componentes críticos en caso de fallas.

6.2.2.2.3 Análisis de viabilidad

El **Análisis de Viabilidad** justifica que la operación es técnica y operativamente factible. Este documento aborda si los recursos, tecnologías y procedimientos previstos son suficientes para

ejecutar la operación de manera segura. En el contexto de un enjambre de drones, este análisis debe incluir:

- **Viabilidad técnica:** Evaluación de la capacidad de la tecnología para gestionar un enjambre de múltiples drones, incluyendo la estabilidad del sistema de comunicaciones y la capacidad de los drones para coordinarse entre sí.
- **Viabilidad operativa:** Evaluación de la capacidad del personal para gestionar y coordinar la operación. En particular, se evalúa si los operadores tienen las competencias necesarias para gestionar las complejidades de los vuelos de enjambre.

6.2.2.2.4 CONOPS

El **CONOPS** describe cómo se llevará a cabo la operación de drones. Este documento proporciona a AESA un contexto operativo detallado, y debe incluir:

- **Objetivos de la misión:** Descripción de la misión, incluyendo los propósitos y resultados esperados.
- **Entorno operativo:** Descripción del espacio aéreo donde se realizará la operación. Incluye mapas, rutas de vuelo, y alturas máximas y mínimas permitidas.
- **Medidas de contingencia:** Planes para gestionar incidentes o problemas inesperados durante la operación, como la pérdida de control de un dron o una emergencia meteorológica.

6.2.2.2.5 Especificación técnica de la aeronave

Este documento ofrece una descripción técnica detallada de cada dron que formará parte del enjambre. Algunos de los aspectos que deben describirse son:

- **Dimensiones y peso:** Detalles técnicos de la estructura física del dron.
- **Sistemas de propulsión:** Información sobre los motores y hélices utilizadas, y su capacidad de carga.
- **Sistemas de navegación:** Tecnologías como GNSS, sistemas inerciales y cualquier otro sensor que se utilice para garantizar la precisión y seguridad de los vuelos.
- **Capacidad de comunicaciones:** Protocolos y sistemas de comunicación utilizados, como WiFi o MAVLink, para asegurar la sincronización del enjambre y el control desde la GCS.

6.2.2.2.6 Seguro de Responsabilidad Civil

AESA exige que todos los operadores de drones en la categoría Specific cuenten con un **seguro de responsabilidad civil** que cubra los daños a terceros en caso de accidente. El monto de la cobertura debe ser suficiente para cubrir los posibles daños derivados de la operación.

6.2.2.2.7 Formación del operador

Es importante destacar que, además de la documentación técnica, **AESA exige que el operador esté entrenado en el CONOPS (Concept of Operations)** presentado. Esta formación debe realizarse a través de una **entidad autorizada**, y garantiza que el operador tiene las habilidades y conocimientos necesarios para llevar a cabo la operación con seguridad, especialmente en situaciones de emergencia o fallo del sistema.

6.2.2.3 Formalización de la solicitud

Todos los documentos deben ser presentados a través de la sede electrónica de AESA, en formato digital y siguiendo los procedimientos establecidos por la agencia. Una vez que la solicitud ha sido presentada, AESA llevará a cabo una evaluación exhaustiva de los documentos.

El proceso de evaluación de AESA implica una revisión exhaustiva de cada uno de los documentos presentados. Además del análisis SORA, AESA también evaluará:

- Capacidades técnicas del operador: AESA evaluará si el operador cuenta con los recursos técnicos adecuados, como sistemas de GCS, redundancia de comunicaciones y sistemas de control automatizado.
- Competencias del personal: Se evaluará si el personal tiene la formación y experiencia necesarias para gestionar la complejidad del vuelo de enjambres.

Si AESA considera que los documentos presentados no son suficientes, puede solicitar documentación adicional o aclaraciones antes de emitir la autorización. Por ejemplo, Aunque los drones en la categoría específica no requieren un Certificado de Aeronavegabilidad como las aeronaves tripuladas, en algunos casos, se puede requerir que el operador presente certificaciones adicionales. Estas pueden incluir:

- **Certificados de homologación de sistemas:** En especial para componentes críticos, como sistemas de comunicación o control.
- **Pruebas de vuelo previas:** Resultados de simulaciones o pruebas de vuelo realizadas en entornos controlados, demostrando la estabilidad y seguridad del enjambre.

Si la solicitud es aprobada, AESA emitirá una autorización operacional que permitirá al operador llevar a cabo la operación bajo las condiciones y limitaciones especificadas. Esta autorización estará sujeta a revisión y puede ser revocada si se incumplen las condiciones establecidas o si la operación genera riesgos imprevistos.

Este proceso garantiza que las operaciones con enjambres de drones se realicen bajo estrictos controles de seguridad y cumpliendo con los más altos estándares normativos. La presentación de documentos completos y detallados es esencial para demostrar la capacidad técnica y operativa del operador, asegurando que la operación se ejecutará sin poner en riesgo la seguridad pública ni la infraestructura.



Figura 45 Nivel de complejidad asociado al análisis de riesgo y documentación a presentar para obtener la autorización operacional

7. Conclusiones

El proyecto desarrollado ha permitido abordar con éxito los desafíos técnicos, operativos y normativos asociados a la implementación de un sistema de enjambre de UAS. A través del diseño, construcción y validación de un demostrador de vuelo en un entorno controlado, se ha logrado integrar de manera efectiva los distintos componentes del sistema, estableciendo una base sólida para el desarrollo futuro de esta tecnología.

En primer lugar, el sistema ha demostrado la viabilidad técnica del concepto de vuelo en enjambre mediante una arquitectura centralizada. La elección de tecnologías como el protocolo MAVLink y la comunicación basada en Wi-Fi ha permitido coordinar múltiples drones con precisión, asegurando una sincronización robusta entre ellos y una operación fiable bajo las condiciones establecidas. Este logro reafirma la posibilidad de implementar sistemas avanzados de enjambre en aplicaciones prácticas, garantizando tanto la eficiencia como la funcionalidad.

Por otro lado, la integración de componentes hardware y software ha sido clave para el éxito del proyecto. El firmware Skybrush y los sistemas de navegación avanzada, junto con la incorporación de GNSS RTK y mecanismos de redundancia para la seguridad del vuelo, han permitido que los drones operen de manera autónoma y respondan de forma efectiva a los comandos emitidos desde la estación de control terrestre (GCS). Esta integración no solo ha facilitado la ejecución de misiones sincronizadas, sino que también ha demostrado la escalabilidad del sistema para operaciones más complejas.

Desde un punto de vista normativo, el trabajo ha cubierto las exigencias regulatorias vigentes en España y Europa. Se han determinado los requisitos que exige tanto la normativa como AESA como puede ser el análisis y la aplicación de metodologías como SORA, que sirven para garantizar que el sistema opere dentro de los márgenes de seguridad requeridos, minimizando riesgos y asegurando su conformidad legal. Este aspecto es especialmente relevante, dado que establece un marco de referencia para futuras aplicaciones comerciales y de investigación en el ámbito de los enjambres de drones.

Las pruebas de vuelo realizadas han validado la funcionalidad del sistema en condiciones reales, demostrando su capacidad para ejecutar misiones con precisión y autonomía. La operación sincronizada de los drones y su capacidad para responder ante interrupciones en las comunicaciones destacan como logros significativos. No obstante, durante estas pruebas también se identificaron áreas de mejora, como la necesidad de optimizar la duración de las baterías y explorar arquitecturas descentralizadas que incrementen la resiliencia y escalabilidad del sistema en escenarios más dinámicos.

Este proyecto ha dejado en evidencia el gran potencial de los enjambres de UAS para diversas aplicaciones, desde la logística hasta la gestión de desastres y los espectáculos de entretenimiento. Además, su desarrollo contribuye al avance del estado del arte en el campo de los sistemas autónomos y de enjambre, sentando las bases para nuevas investigaciones que incorporen tecnologías emergentes como redes 5G o algoritmos más avanzados de inteligencia distribuida.

El anexo incluido en este trabajo, que detalla minuciosamente el proceso de configuración de los distintos componentes hardware y software utilizados en el demostrador de vuelo, representa una valiosa referencia para futuros alumnos e investigadores interesados en el desarrollo de enjambres de UAS. Este apartado proporciona una guía práctica y fundamentada que puede servir como punto de partida para llevar a cabo proyectos más avanzados, permitiendo a otros explorar y ampliar las capacidades de esta tecnología en nuevos escenarios y aplicaciones. Al documentar de manera estructurada las configuraciones y las soluciones implementadas, se facilita la replicabilidad del sistema y se promueve la innovación en áreas como la logística, la agricultura de precisión, la gestión de emergencias y la inteligencia artificial aplicada al swarming, marcando así un camino claro hacia la evolución continua de este campo emergente.

En conclusión, el trabajo no solo ha alcanzado sus objetivos iniciales, sino que también ha abierto nuevas oportunidades para el desarrollo de enjambres de UAS. Este avance es un paso importante hacia la implementación de sistemas más sofisticados, eficientes y adaptables, capaces de abordar los retos tecnológicos y operativos de la próxima generación de aplicaciones en el ámbito de los drones.

9. ANEXO: Proceso de configuración de los distintos componentes hardware

9.1 Configuración del router ASUS RT AX35U

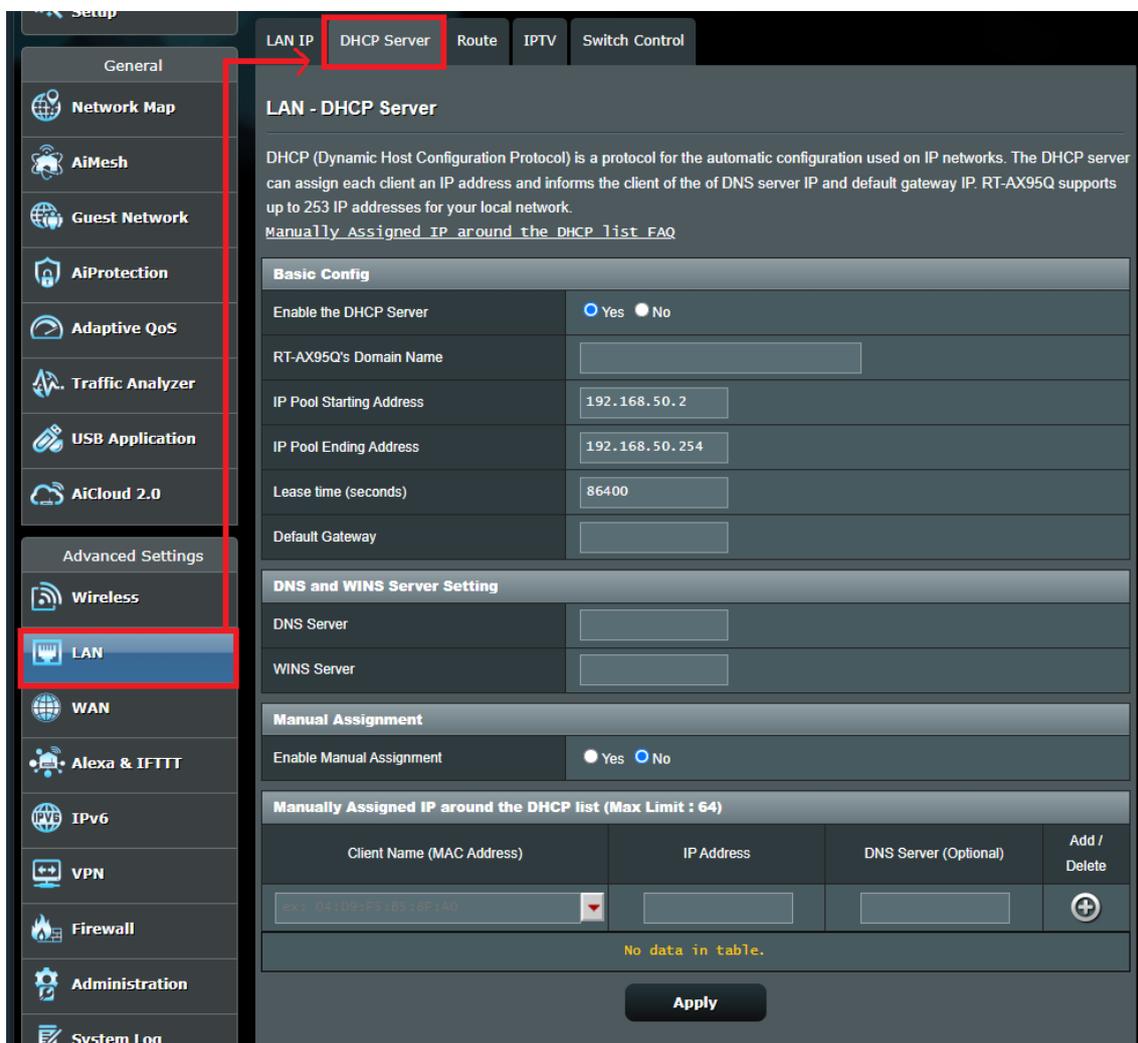
Para configurar el **router ASUS RT AX35U**, siga los siguientes pasos:

1. Primero conecta el router a la corriente eléctrica y enciéndelo utilizando el interruptor I/O en la parte trasera. Luego, conecta un cable RJ45 (azul) a uno de los puertos LAN (amarillos) del router, y el otro extremo a un puerto LAN del ordenador.
2. Asegúrate de que el ordenador detecta la conexión por cable (LAN). Una vez establecida la conexión, accede a la dirección <http://www.asus.router.com> desde un navegador web.
3. En la interfaz de configuración del router, define los siguientes parámetros (seleccionables por el usuario):
 - SSID (para ambas bandas): SwarmTech
 - Contraseña: SafeFlight24_!!
 - Nombre de usuario: admin
 - Contraseña: admin24_!!
4. Accede con las credenciales recién definidas al panel de control del router en la dirección http://www.asusrouter.com/Main_Login.asp.
5. Dentro del panel, en la pestaña LAN > Dirección IP LAN, ajusta la siguiente dirección:

LAN IP	DHCP Server	Route	IPTV	Switch Control
LAN - LAN IP				
Configure the LAN setting of ZenWiFi AX.				
Host Name	ZenWiFi_XT8			
ZenWiFi AX's Domain Name				
IP Address	192.168.88.1			
Subnet Mask	255.255.255.0			

- IP LAN: 192.168.0.254 (para la GCS primaria).
- MAVLink ID: Configura este valor a 254, según lo definido en Skybrush.
- Máscara de subred: Mantén el valor predeterminado de 255.255.255.0.

6. Seguidamente, se deberá desactivar el servidor DHCP en el router o como alternativa limitar las IPs que puede asignar automáticamente, sigue estos pasos.
 - Primero, accede al panel de control del router. En la sección Basic Config, busca el apartado del servidor DHCP. Si deseas desactivarlo completamente, selecciona la opción "No" en el radiobutton correspondiente a Enable the DHCP Server.
 - Si prefieres limitar las IPs asignadas automáticamente por el servidor DHCP (en lugar de desactivarlo), ajusta los campos IP Pool Starting Address y Ending Address para que comprendan el rango deseado, en este caso, entre 192.168.0.252 y 192.168.0.254. Esto permitirá que solo se asignen esas dos direcciones IP de manera automática.



7. A continuación, accede a la pestaña **Wireless (Inalámbrico)**. En este menú, selecciona la **banda de 2.4 GHz** y establece el **modo inalámbrico en Legacy**. Luego, pulsa en **Aplicar**. Al hacer esto, la conexión Wi-Fi se desconectará automáticamente, ya que el router reiniciará la configuración.

Establezca la siguiente información inalámbrica.

Habilitar Smart Connect (conexión inteligente)	<input type="checkbox"/> OFF
Banda	2.4 GHz ▾
Nombre de red (SSID)	SwarmTech
Ocultar SSID	<input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No
Modo inalámbrico	Legacy ▾ <input checked="" type="checkbox"/> Protección b/g
WiFi Agile Multiband	Habilitar ▾
Target Wake Time	Deshabilitar ▾
Canal	Automático ▾ Canal de control actual: 13 <input type="checkbox"/> Auto select channel including channel 12, 13
Método de autenticación	WPA2-Personal ▾ ⓘ
Cifrado WPA	AES ▾
Clave WPA precompartida	SafeFlight24_!! Muy intensa
Fotogramas de administración protegidos	Capaz ▾
Intervalo de rotación de la clave de red	3600

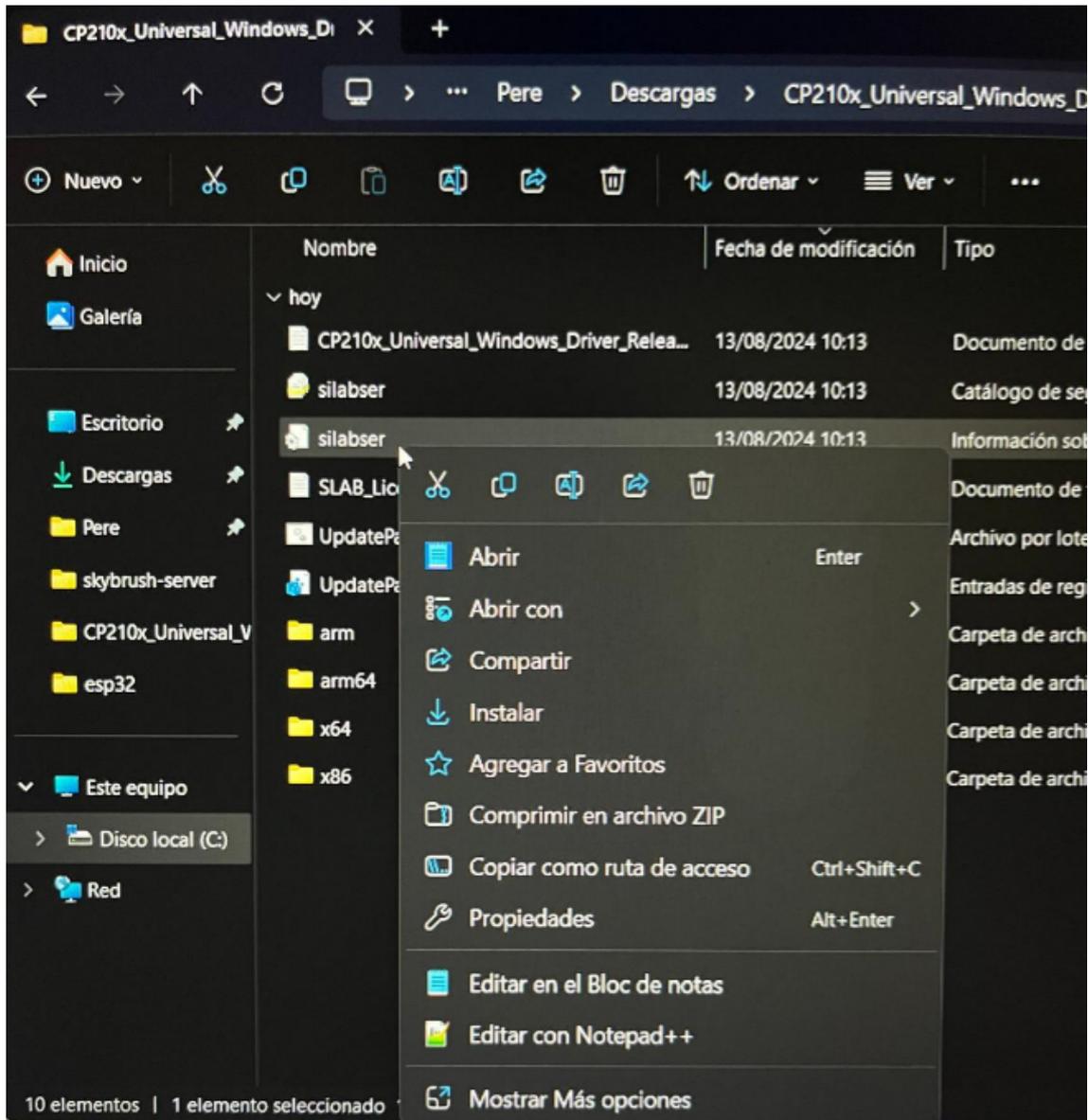
Aplicar

8. Para restablecer la conexión, actualiza el listado de redes Wi-Fi en tu dispositivo y vuelve a conectarte a la red SwarmTech con las credenciales configuradas previamente. Esto completará la configuración inalámbrica en el router, optimizando la conexión para el sistema de drones.

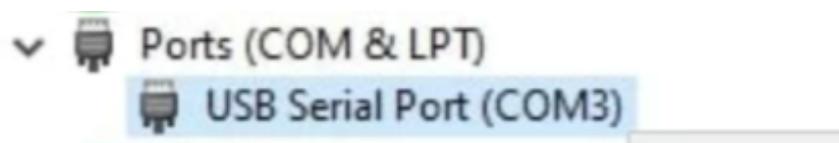
Con esto, la configuración básica del router estará lista para su funcionamiento con el sistema de drones.

9.2 Configuración de la Placa WiFi ESP32-DevKitC-V4

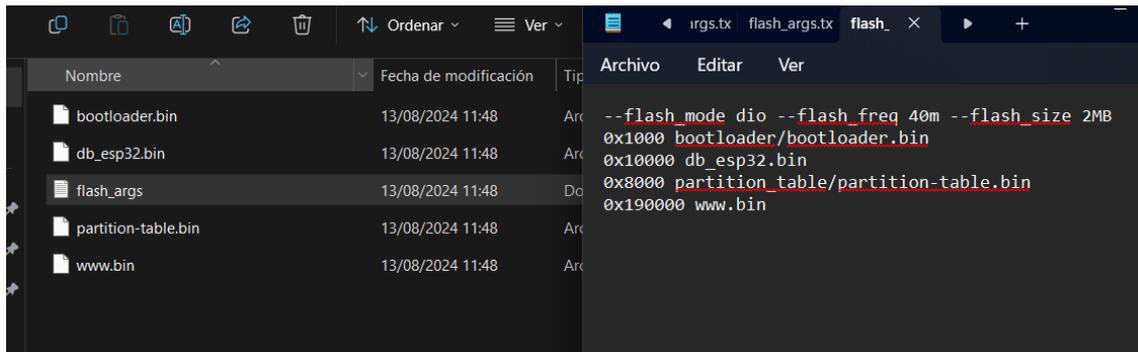
1. **El primer paso consiste en la instalación de drivers CP210x USB to UART Bridge** para poder establecer y abrir el puerto COM. Para ello, acceda al sitio oficial de Silicon Labs y descárguelos: <https://www.silabs.com/developers/usb-to-uart-bridge-vcp-drivers>
2. Descomprime el archivo descargado y navega por las carpetas hasta encontrar el archivo "silabser".



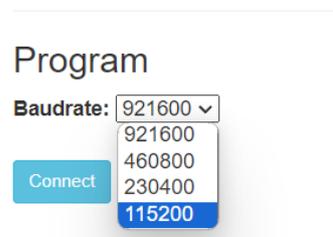
3. Haz clic derecho en el archivo "**silabser**" y selecciona "**Instalar**". Sigue las indicaciones para completar la instalación de los drivers.
4. **Seguidamente**, conecta un **cable USB-A a microUSB** (que soporte transmisión de datos) al ordenador y a la **ESP32-DevKitC-V4**. El LED rojo de la placa debe encenderse de manera constante, lo que indica que la placa está correctamente conectada.
5. Verifica la conexión en el **Administrador de dispositivos** de Windows (puedes abrirlo rápidamente con el acceso directo **Windows + X**). Busca en la sección de **puertos COM** el dispositivo conectado.



- Una vez comprobado que se establece comunicación por puerto físico, **descarga y preparación del firmware DroneBridge para ESP32** desde: <https://github.com/DroneBridge/ESP32/releases>.
- Descomprime los archivos y selecciona la carpeta correspondiente a **ESP32** (según el modelo del chip).
- Abre el archivo **flash_args.txt** para comprobar los pointers de memoria y asegúrate de que los parámetros están correctamente configurados.



- Seguidamente, se realiza el flasheo del firmware para la placa **ESP32**. Abre el navegador **Microsoft Edge** y accede a la herramienta de flasheo online: <https://espressif.github.io/esptool-js/>.
- Selecciona un **baudrate de 115200 bps**.



- Presiona **"Connect"**. Elige el puerto serie (por ejemplo, **COM4**) previamente determinado en el Administrador de dispositivos.
- La consola mostrará los resultados. Haz clic en **"Borrar Flash"** y espera a que finalice el proceso de borrado.
- A continuación, selecciona **"Agregar archivo"** hasta tener cuatro entradas
- Carga los archivos de firmware en las siguientes posiciones:
 - bootloader.bin**
 - db_esp32.bin**
 - partition-table.bin**
 - [www.bin](#)

15. Para cada archivo, especifica la dirección de memoria de acuerdo con el archivo **flash_args.txt**.

```
--flash_mode dio --flash_freq 40m --flash_size 2MB  
0x1000 bootloader/bootloader.bin  
0x10000 db_esp32.bin  
0x8000 partition_table/partition-table.bin  
0x190000 www.bin
```

16. Una vez definido, haz clic en "**Program**" para flashear el firmware en la ESP32.

Para validar que el flasheo del firmware es correcto se deberán seguir los siguientes pasos:

17. **Verificación del flasheo:** Al finalizar, la placa ESP32 debería generar una nueva red Wi-Fi con los siguientes detalles:
- **SSID:** DroneBridge for ESP32
 - **Password:** dronebridge
18. Conéctate a esta red Wi-Fi y abre el navegador para acceder a la página de configuración de DroneBridge:
- <http://dronebridge.local/>.
19. **Configura el enlace de comunicaciones de DroneBridge en la ESP32.** Para ello, cambia los siguientes parámetros en la interfaz de DroneBridge:
- **Modo de la ESP32:** Access Point.
 - **SSID:** DroneBridge for ESP32.
 - **Password:** dronebridge.
 - **Pines TX/RX:** Ajusta los pines de acuerdo con los que estén conectados en la placa Wi-Fi:
 - **RX:** GPIO3.
 - **TX:** GPIO1.
 - **Protocolo UART:** Selecciona MAVLink.
 - **Baudrate UART:** Configúralo a 115200 bps.
20. **Aplicación de los cambios:** Haz clic en "**Aplicar cambios**" para guardar la configuración. Con esto, la ESP32 estará lista para comunicarse con el sistema y con la Pixhawk a través del protocolo MAVLink.

Este proceso garantiza que la **ESP32-DevKitC-V4** esté configurada correctamente para operar dentro del sistema de comunicación, permitiendo la transmisión de datos de telemetría y control entre la **Ground Control Station (GCS)** y los drones.

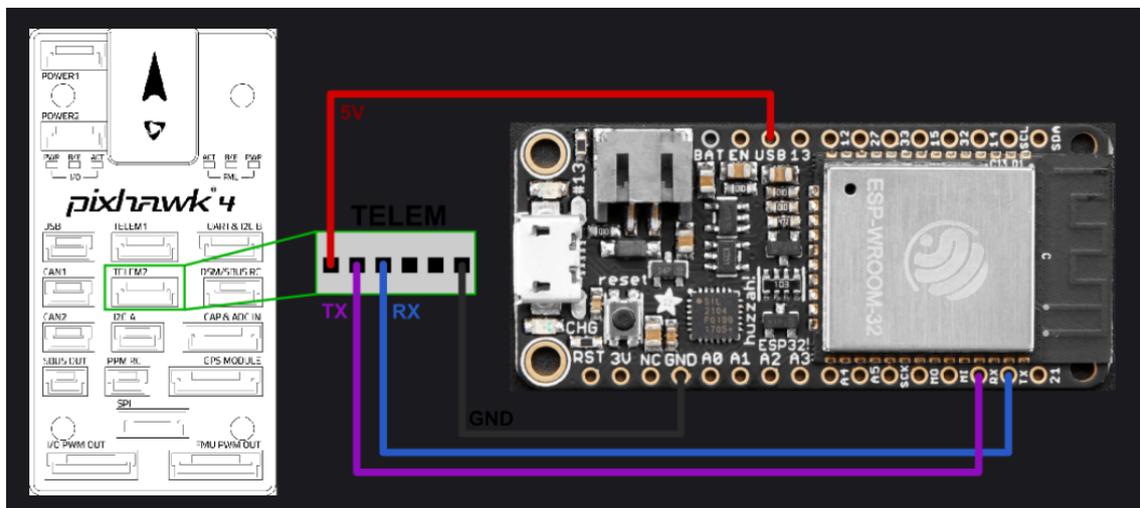
9.3 Prueba de comunicación entre ESP32 y Pixhawk

Después de haber completado la configuración de la **ESP32** siguiendo los pasos previos, es necesario establecer la comunicación entre la **ESP32** y la **Pixhawk** para poder intercambiar datos de telemetría y comandos de control. Para ello, es recomendable utilizar los siguientes elementos:

- Una **protoboard** para facilitar el montaje.
- **Cables de conexión** para realizar los puentes entre los pines.
- La **Pixhawk** como controlador de vuelo.
- Un **cable USB-C** para alimentar la Pixhawk durante las pruebas.

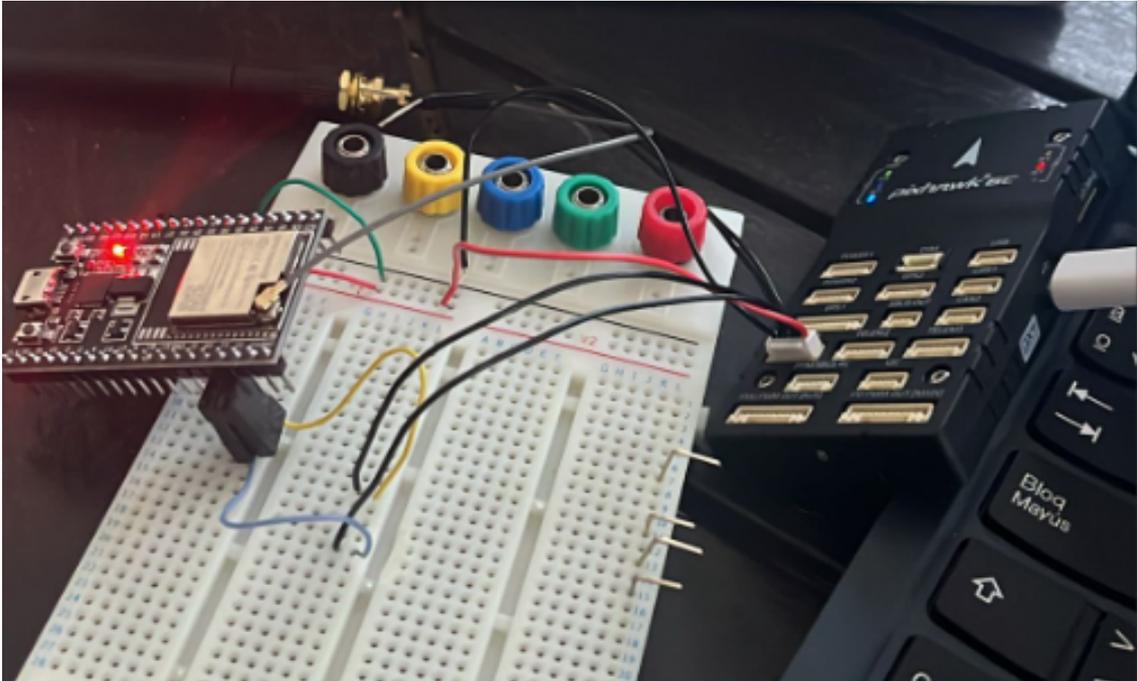
El esquema de conexión que debe seguirse es el siguiente:

- El pin **TX** (transmisión) de la **Pixhawk** debe conectarse al pin **RX** (recepción) de la **ESP32**.
- El pin **RX** (recepción) de la **Pixhawk** debe conectarse al pin **TX** (transmisión) de la **ESP32**.



Es importante recordar que los pines de transmisión y recepción deben ir **crucados** entre la **Pixhawk** y la **ESP32** para que la comunicación UART funcione correctamente. Una vez realizado el puenteo en la protoboard, la Pixhawk debe estar conectada a través del cable USB-C para alimentarla y proceder a la prueba de comunicación entre los dispositivos.

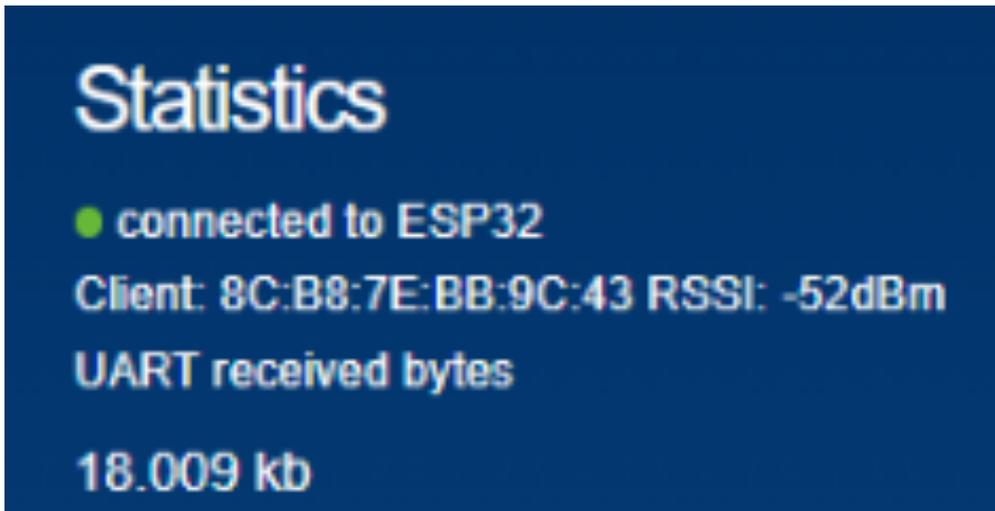
A continuación, se describe cómo quedaría el cableado de la **ESP32** y la **Pixhawk** en una **protoboard**. Los cables TX y RX deben estar cruzados entre los dispositivos: el pin **TX de la Pixhawk** debe estar conectado al **RX de la ESP32**, y el pin **RX de la Pixhawk** debe conectarse al **TX de la ESP32**. Al finalizar el montaje en la protoboard, asegúrate de que las conexiones están firmes y que los pines correctos están enlazados.



Una vez realizado el puenteo, es momento de conectar la **alimentación a la Pixhawk** mediante el cable **USB-C**. Si el **LED rojo** de la Pixhawk se enciende y permanece **estático**, esto indica que la placa está correctamente conectada y alimentada.

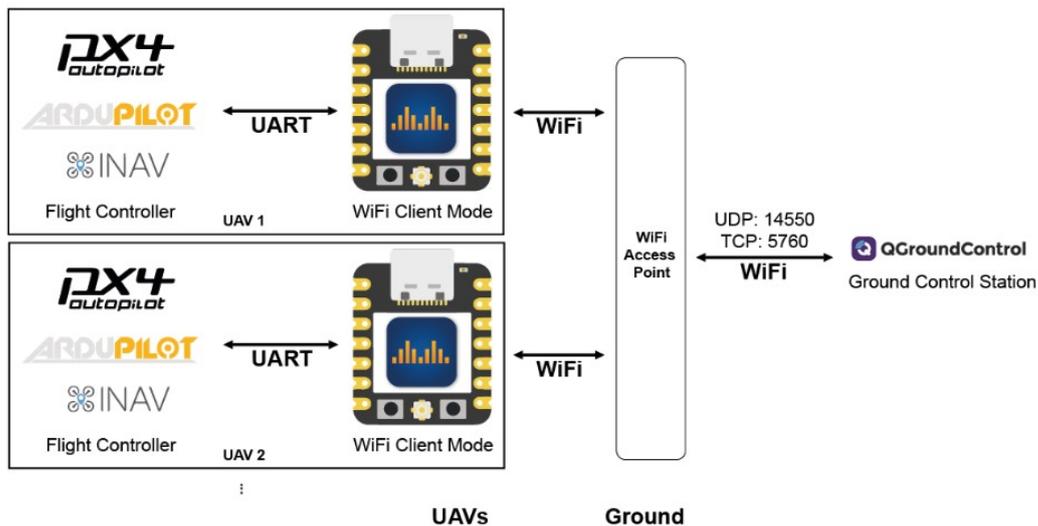
Sin embargo, el encendido del LED no confirma que haya **comunicación efectiva** entre los dispositivos. Para comprobar si hay intercambio de datos. Para comprobar si hay comunicación efectiva entre la **ESP32** y la **Pixhawk**, será necesario conectarse nuevamente a la red Wi-Fi generada por la placa ESP32. El **SSID** por defecto de esta red será **“DroneBridge for ESP32”**. Después de conectarse, accede nuevamente a la interfaz web de DroneBridge utilizando la siguiente dirección: <http://dronebridge.local/>.

Una vez dentro de la interfaz de DroneBridge, puedes verificar la **conexión y la transferencia de datos** accediendo a la sección **“Statistics”**. Si la comunicación entre la **ESP32** y la **Pixhawk** está funcionando correctamente, podrás observar un aumento en el valor de **kilobytes recibidos** en tiempo real. Este indicador confirmará que los paquetes de datos están siendo transmitidos y recibidos adecuadamente entre ambos dispositivos, lo que garantiza que la configuración y el puenteo han sido correctos.



Una vez confirmada la correcta configuración y recepción de datos desde la **Pixhawk** a la **ESP32**, es necesario configurar la **ESP32** en **modo cliente** para que pueda conectarse al router y funcionar como un nodo dentro de la red general del sistema.

WiFi Client Mode



ESP32 will connect to the specified WiFi Access Point. This way multiple drones can connect to one ground control station (GCS).

La razón principal para cambiar la **ESP32** a modo cliente es que, en este modo, la ESP32 deja de actuar como un **punto de acceso (Access Point)** que genera su propia red Wi-Fi y, en cambio, se conecta a la red creada por el **router**. Esto es esencial en configuraciones con múltiples drones, ya que permite a cada dispositivo estar conectado a una **red centralizada** (creada por el router),

donde la **Ground Control Station (GCS)** puede gestionar y controlar todos los drones de manera simultánea a través de una única red.

En modo cliente, cada **ESP32** se conectará al router y recibirá una dirección IP asignada, lo que facilita el intercambio de datos en tiempo real entre los drones y la GCS, garantizando una comunicación estable y confiable en toda la red. Este paso es clave para integrar la **ESP32** en un entorno donde varios drones se comunican con un único router, optimizando la gestión de la información y la telemetría, además de facilitar el envío de comandos de control a través de la red.

9.4 Configuración de la ESP32 en Modo Cliente

- 1. Conexión a la red Wi-Fi de la ESP32:**
Conéctate a la red Wi-Fi generada por la **ESP32** utilizando las credenciales configuradas previamente. El SSID por defecto será "**DroneBridge for ESP32**" y la contraseña "**dronebridge**".
- 2. Acceso a la interfaz de configuración:**
Accede a la página de configuración de **DroneBridge** abriendo un navegador y entrando en la dirección:
<http://dronebridge.local/>
- 3. Cambios de configuración:**
Una vez dentro de la interfaz de configuración, ajusta los siguientes parámetros para poner la ESP32 en modo cliente:
 - **Modo de la ESP32:** Cambiar a "**Client Mode**".
 - **SSID:** Introducir el nombre de la red Wi-Fi del router, en este caso **SwarmTech**.
 - **Contraseña:** Introducir la contraseña del router, que es **SafeFlight24_!!**.
- 4. Configuración de los pines TX/RX:**
Cambia los pines **TX** y **RX** de la ESP32 de acuerdo con las conexiones físicas en tu dispositivo. En este caso, ajusta los pines a:
 - **RX:** GPIO3
 - **TX:** GPIO1

RXD0	34	I/O	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2
TXD0	35	I/O	GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2

- 5. Verificación del protocolo y baudrate:**
 - Asegúrate de que el **protocolo UART** esté configurado como **MavLink**.
 - Configura el **UART baudrate** a **115200 bps**.

The screenshot displays the web interface for an ESP32 device. The top section, titled "Statistics", shows the device is connected to an ESP32 with a client ID of 8C:B8:7E:BB:9C:43 and an RSSI of -23dBm. It reports 328,188 kb of UART received bytes, 0 connected TCP clients, and 1 connected UDP client. The bottom section, titled "Settings", is for Wi-Fi configuration. It includes a dropdown for "WiFi Client Mode", input fields for "SSID" (SwarmTech) and "Password" (SafeFlight24_!!), and fields for UART pins: TX (1), RX (3), RTS (0), and CTS (0). Other settings include a UART RTS threshold of 64, a protocol of MAVLink, a baud rate of 115200, and a maximum packet size of 64. At the bottom, there are buttons for "ADD CUSTOM UDP TARGET", "SAVE SETTINGS", and "REBOOT ESP32".

6. **Aplicar** **cambios:**
Verifica que todos los parámetros estén correctamente configurados, y después haz clic en "Save" para aplicar los cambios.
7. **Reinicio** **de** **la** **ESP32:**
Desconecta y vuelve a conectar la placa ESP32 para que los cambios surtan efecto. Esto reiniciará el dispositivo y aplicará la nueva configuración.
8. **Conexión** **a** **la** **red** **del** **router:**
Una vez configurada en modo cliente, la **ESP32** ya no emitirá su propia señal Wi-Fi como punto de acceso. Ahora se conectará automáticamente al router configurado. Para cambiarla nuevamente a modo **Access Point**, deberás presionar el botón de "**boot**" en la ESP32 para reiniciar la configuración Wi-Fi.

Esta configuración permite integrar la **ESP32** como cliente dentro de la red gestionada por el router, facilitando la comunicación eficiente con la **Ground Control Station (GCS)** y otros dispositivos conectados en la misma red.

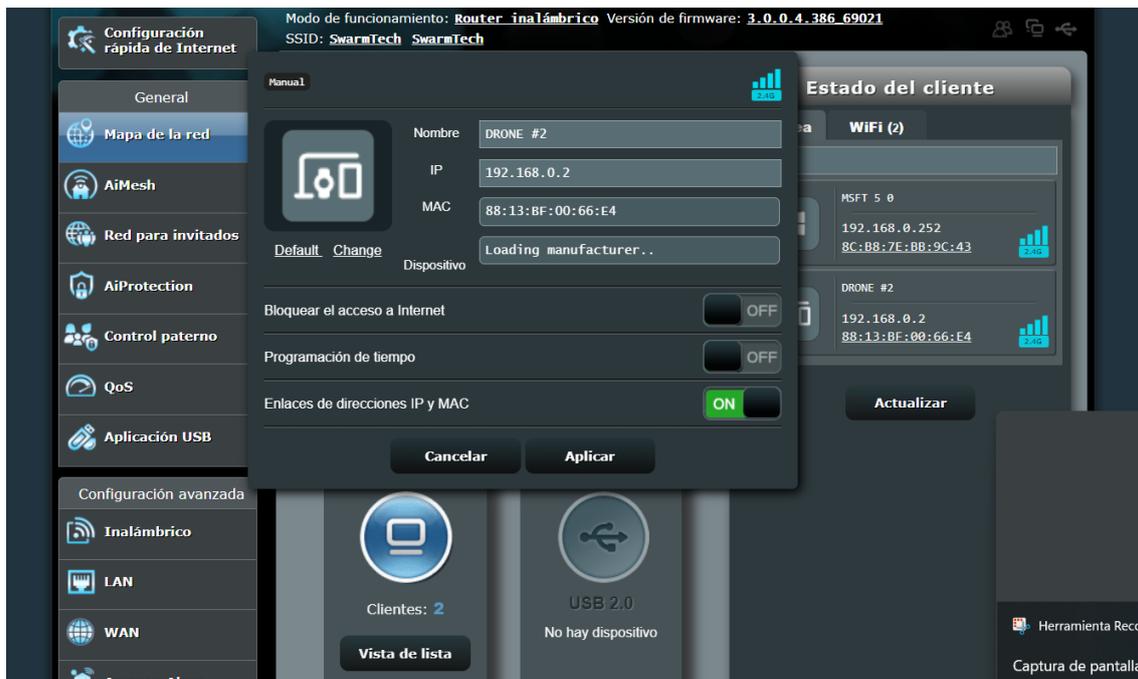
9.5 Asignación de IPs a las ESP32

Para evitar interferencias entre los datos y asegurar una correcta identificación de cada dispositivo, es fundamental asignar una **IP única** a cada una de las placas **ESP32**. Esto garantiza que cada ESP32 dentro de la red tenga un identificador exclusivo, evitando posibles conflictos de red.

Sigue estos pasos para asignar manualmente las IPs a las placas ESP32:

1. **Enchufar el router:** Asegúrate de que el **router ASUS** está encendido y conectado correctamente.
2. **Conectar la placa ESP32 al ordenador:** La ESP32 ya debe estar configurada en **modo cliente**, por lo que no generará una red Wi-Fi propia. No verás ninguna señal de Wi-Fi en el ordenador.
3. **Conectarse a la red del router:** Conéctate a la red **SwarmTech** utilizando las credenciales establecidas:
 - **SSID:** SwarmTech
 - **Password:** SafeFlight24_!!
4. **Acceder al panel de control del router:** Abre un navegador y accede al panel de control del router en http://www.asusrouter.com/Main_Login.asp. Ingresa las credenciales de administrador:
 - **Usuario:** admin
 - **Contraseña:** admin24_!!
5. **Mapa de la red:** Una vez en el panel de control, en el menú lateral, selecciona **Mapa de la red**.
6. **Clientes conectados:** Dentro del **Mapa de la red**, haz clic en la pestaña de **Clientes** para ver todos los dispositivos conectados a la red. Deberías ver una lista de dispositivos, entre ellos, la placa ESP32 con un nombre como **DroneBridgeESP32** o **ESP32...**
7. **Identificación de la placa ESP32:** Localiza tu ESP32 en la lista de dispositivos. Haz clic en su nombre para desplegar la configuración de red.
8. **Asignación de nombre e IP:**
 - **Nombre:** Cambia el nombre del dispositivo para reflejar su número de dron correspondiente. Por ejemplo, para el dron número 2, el nombre podría ser **DRONE #2**.

- **Dirección IP:** Asigna una IP acorde al número del dron. En este caso, para el **Drone #2**, asigna la IP **192.168.0.2**. Asegúrate de seguir una nomenclatura coherente para todos los drones.
9. **Guardar los cambios:** Después de cambiar el nombre e IP, guarda los cambios. Repite este proceso para cada ESP32 asignando una IP diferente y única a cada una de ellas, acorde a los números de dron.



Este proceso garantiza que cada **ESP32** tenga una identificación y dirección IP únicas, lo que evita conflictos y facilita la gestión de la red.

9.6 Configuración de la comunicación Pixhawk UART - WiFi / UDP a la GCS

Una vez que las **ESP32** han sido configuradas en **modo cliente** y están conectadas al router, el siguiente paso es habilitar el envío de datos de la **Pixhawk** hacia la **Ground Control Station (GCS)** mediante comunicación **Wi-Fi/UDP**. Es importante tener en cuenta que la **ESP32** **no enviará paquetes UDP** si no recibe primero un paquete inicial de la GCS. A continuación, se describe el proceso completo para configurar esta comunicación.

1. **Asegurar la conectividad:**
 - Asegúrate de que el **router** está encendido y conectado, con las ESP32 correctamente enlazadas.
 - Conéctate a la red Wi-Fi del router, en este caso **SwarmTech**.

2. Conexión de la Pixhawk:

- La **Pixhawk** debe estar conectada al módulo Wi-Fi a través de los pines UART y alimentada correctamente.
- Para verificar la conexión, abre la consola de comandos de tu ordenador (cmd) y ejecuta el siguiente comando de **ping** hacia la IP de la ESP32 (variable según la configuración de cada ESP32): *ping 192.168.0.2*

Si hay comunicación, el comando reflejará que se están recibiendo paquetes y por ende, confirmará si hay conectividad entre el ordenador y la ESP32. También se puede emplear wireshark para observar la transferencia de paquetes.

3. Configuración en QGroundControl:

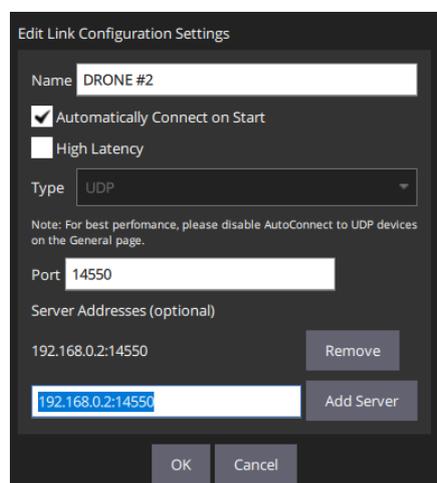
- Abre **QGroundControl** en tu ordenador.
- Navega a **Q > Application Settings > Comms Links > Add** para agregar una nueva configuración de comunicación.

4. Parámetros de configuración:

- **Nombre:** Escribe un nombre identificativo para la configuración, se recomienda algo como **DRONE #N**, donde N es el número del dron (por ejemplo, DRONE #2 para el dron número 2).
- **Tipo de conexión:** Selecciona **UDP**.
- **Puerto:** Introduce el puerto estándar **14550**.
- **Dirección del servidor:** Especifica la **IP de la ESP32** correspondiente y el puerto. Ejemplo: 192.168.0.2:14550.
- Marca la casilla "**Automatic connect on start**" para que la conexión se inicie automáticamente al abrir QGroundControl.

5. Guardar la configuración:

- Haz clic en "**Add Server**" y luego en "**OK**" para guardar los cambios.



6. **Verificación de la comunicación:** Para confirmar que los paquetes **MAVLink** están siendo enviados correctamente:

- Revisa en **QGroundControl** si aparece el dron configurado con el nombre que diste (por ejemplo, **DRONE #2**). Si la conexión es exitosa, verás los datos de telemetría fluyendo en tiempo real.
- También puedes abrir el **Skybrush Server** para observar los reportes de MAVLink y confirmar la recepción de los datos.
- Alternativamente, usa herramientas de análisis de red como **Wireshark** para comprobar que se están enviando los paquetes **UDP** desde la ESP32 a la GCS.

9.6.1 Solución de problemas:

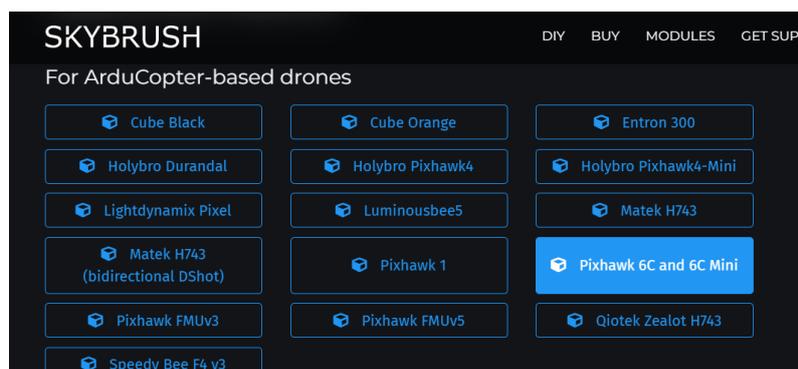
Si no se recibe información en QGroundControl, es posible que algunos parámetros de la **Pixhawk** deban ser revisados. Asegúrate de que la Pixhawk está configurada correctamente para transmitir datos MAVLink a través de UART y Wi-Fi, y que las IPs asignadas a cada dispositivo son correctas. Revisa el baudrate y los protocolos configurados en los puertos UART de la Pixhawk.

Con este procedimiento, la **ESP32** y la **Pixhawk** estarán correctamente configuradas para enviar datos a la **GCS** mediante **UDP** sobre la red **Wi-Fi** del router.

9.7 Flasheo del Firmware Skybrush para Pixhawk 6c

1. **Descarga de herramientas necesarias:**

- **QGroundControl:** Descarga la última versión de **QGroundControl** desde su sitio oficial: [QGroundControl - Descargar](#)
- **Firmware Skybrush para Pixhawk 6c:** Descarga el **firmware de Skybrush** específico para Pixhawk 6c desde: [Skybrush Firmware](#)

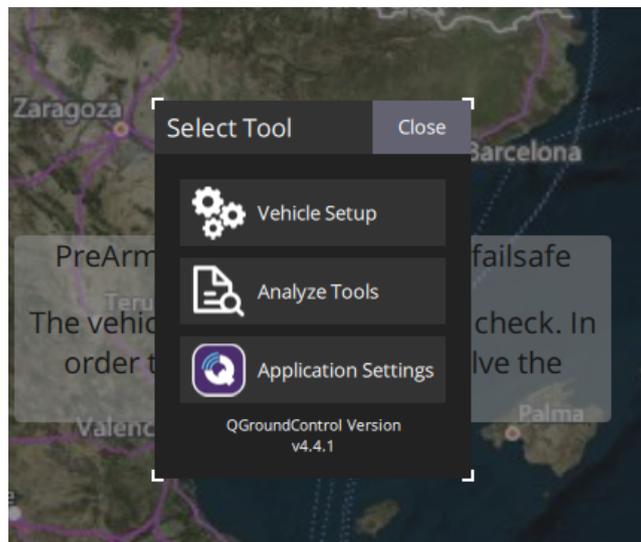


2. Conexión y preparación:

- Abre **QGroundControl** en tu ordenador.
- Conecta la **Pixhawk 6c** al ordenador mediante un cable USB.

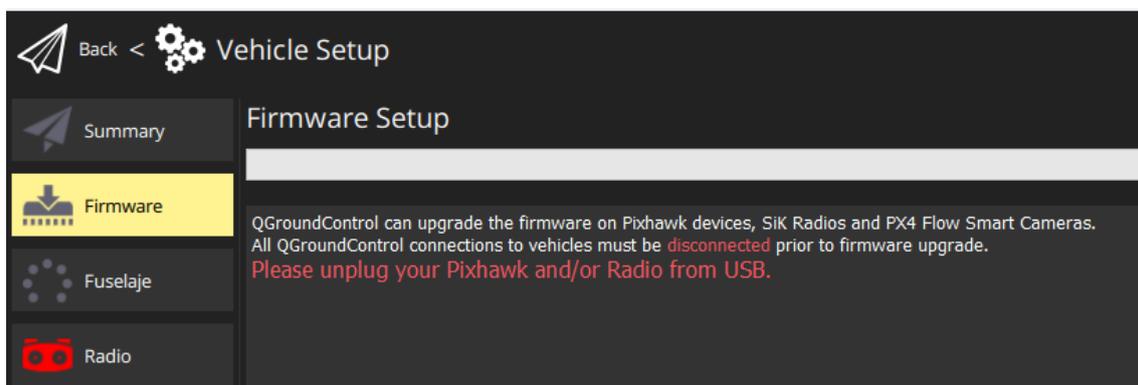
3. Configuración inicial:

- La primera vez que la Pixhawk se conecte, **QGroundControl** te pedirá que especifiques algunos parámetros. En este caso, selecciona que la Pixhawk está basada en **PX4** (Pixhawk 4).
- Luego, en **QGroundControl**, pulsa el logo "Q" en la parte superior izquierda y selecciona **Vehicle Setup**.

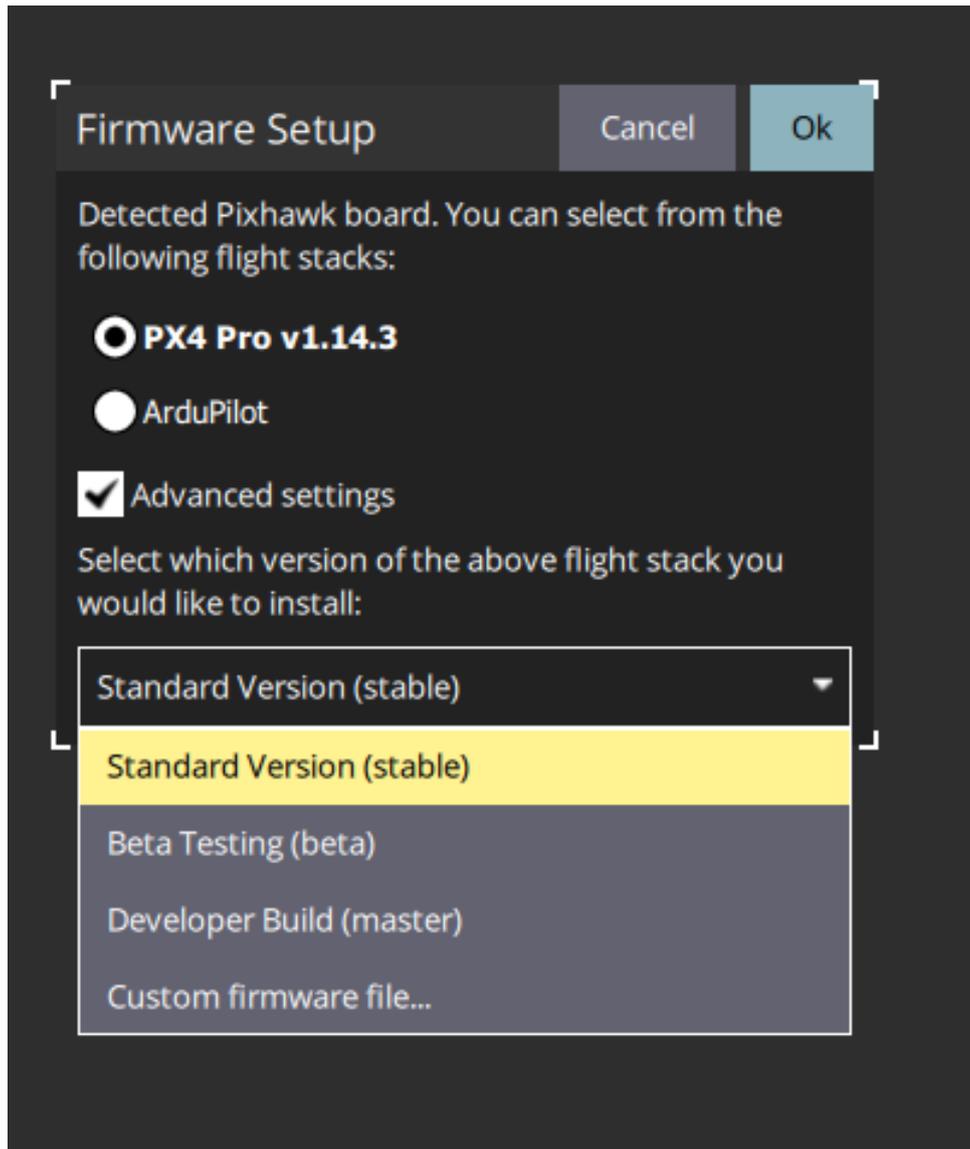


4. Proceso de flasheo:

- En la ventana de **Vehicle Setup**, selecciona la pestaña **Firmware**.



- Desconecta y vuelve a conectar la Pixhawk. Esto habilitará el menú de flasheo.
- Selecciona **PX4** (por defecto) y luego selecciona **Advanced Settings**. En el **combobox**, elige la opción **Custom Firmware File**.



5. **Carga del firmware personalizado:**

- Selecciona el archivo del **firmware Skybrush** que descargaste previamente.
- Sigue las instrucciones de **QGroundControl** para comenzar el proceso de flasheo. Inicialmente, se borrará el firmware anterior y se cargará el nuevo.

6. **Finalización del flasheo:**

- Una vez completado, la Pixhawk se reiniciará automáticamente. **QGroundControl** mostrará que la Pixhawk se desconecta y reconecta durante el reinicio.
- Verifica que el flasheo se ha completado correctamente revisando la telemetría y el estado de la Pixhawk en **QGroundControl**.

Este procedimiento garantizará que tu Pixhawk 6c esté configurada con el **firmware Skybrush**, optimizado para controlar enjambres de drones.

9.8 Configuración de Parámetros en la Pixhawk 6C

- Conexión de la Pixhawk a QGroundControl:**
Conecta la Pixhawk 6C al ordenador y abre **QGroundControl**. Haz clic en el logo **Q** (ubicado en la parte superior izquierda) y selecciona **Vehicle Setup**.
- Acceso a los Parámetros:**
Dentro de la pestaña **Vehicle Setup**, selecciona la opción **Parameters**, ubicada en la última posición del menú.
- Parámetro SYSID_THISMAV:**
Este parámetro asigna un **identificador único** a cada dron. Es fundamental que el número asignado a **SYSID_THISMAV** coincida con el último número de la dirección IP de la **ESP32** conectada al dron.
 - Ejemplo: Si la IP del módulo Wi-Fi es **192.168.0.1**, el valor de **SYSID_THISMAV** debería ser **1**.
 - Sigue este patrón para cada dron (IP: 192.168.0.n // SYSID_THISMAV: n).
- Configuración de los Puertos de Telemetría (SERIALn_PROTOCOL):**
Define el protocolo de comunicación que se usará en cada puerto serial. En este caso, los puertos importantes son **SERIAL1**, **SERIAL2**, y **SERIAL7**. Asegúrate de que todos estén configurados para **MAVLink 2**

SERIAL1_BAUD	57600	Telem1 Baud Rate
SERIAL1_OPTIONS	0	Telem1 options
SERIAL1_PROTOCOL	MAVLink2	Telem1 protocol selection
SERIAL2_BAUD	57600	Telemetry 2 Baud Rate
SERIAL2_OPTIONS	0	Telem2 options
SERIAL2_PROTOCOL	MAVLink2	Telemetry 2 protocol selection

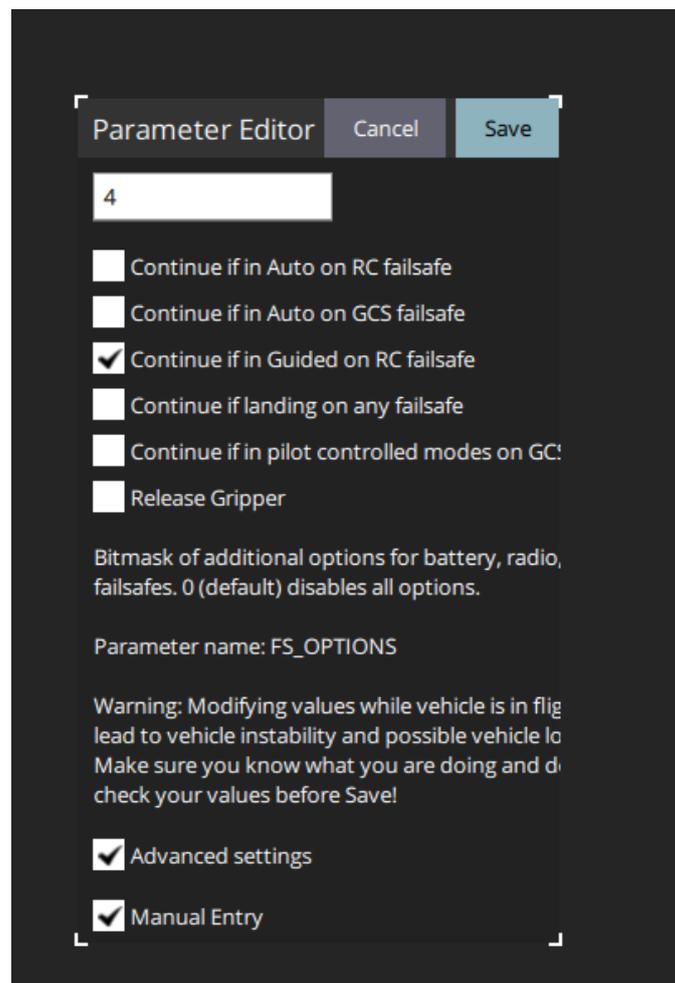
- Velocidad de Transmisión (SERIALn_BAUD):**
Configura la velocidad de transmisión para los puertos mencionados anteriormente. Asigna el valor **115200 bps** a **SERIAL1**, **SERIAL2**, y **SERIAL7**.
- Frecuencia de Envío de Datos (SRn_*):**
Ajusta estos parámetros para definir con qué frecuencia se envían datos de telemetría desde la Pixhawk hacia la **GCS**. Si no necesitas transmitir ciertos datos, establece estos valores en **0** (esto debería estar configurado por defecto).

Search:	SR	Clear
SR1_EXTRA1	0 Hz	Extra data type 1 stream rate to ground station
SR1_EXTRA2	0 Hz	Extra data type 2 stream rate to ground station
SR1_EXTRA3	0 Hz	Extra data type 3 stream rate to ground station
SR1_EXT_STAT	0 Hz	Extended status stream rate to ground station
SR1_PARAMS	0 Hz	Parameter stream rate to ground station
SR1_POSITION	0 Hz	Position stream rate to ground station
SR1_RAW_CTRL	0 Hz	Unused
SR1_RAW_SENS	0 Hz	Raw sensor stream rate

7. **Modo Failsafe (FS_OPTIONS):**

El parámetro **FS_OPTIONS** previene que el dron active el modo **failsafe** si se pierde la conexión del radiocontrol durante un vuelo autónomo (como un show de drones).

- Configura el valor de **FS_OPTIONS** en **4** para evitar que el modo **failsafe** se active automáticamente.



9.8.1 Parámetros para Correcciones RTK

1. Ajustes de EK3 para RTK:

Los siguientes parámetros configuran el filtro de estimación de estado para recibir correcciones de posicionamiento mediante RTK:

- **EK3_PRIMARY**: Establecer a **0**.
- **EK3_SRC1_POSXY**: Establecer a **3**.
- **EK3_SRC1_VELXY**: Establecer a **3**.
- **EK3_SRC1_POSZ**: Establecer a **3**.
- **EK3_SRC1_VELZ**: Establecer a **3**.
- **EK3_SRC1_YAW**: Establecer a **1**.

9.8.2 Parámetros para Optimizar la Maniobrabilidad del Dron

1. Configuración de maniobrabilidad para suavizar las transiciones:

Estos parámetros mejoran la suavidad y velocidad con la que el dron alcanza los waypoints:

- **PSC_JERK_XY**: Establecer a **20**.
- **PSC_JERK_Z**: Establecer a **20**.
- **WPNAV_ACCEL**: Establecer a **800** (el valor máximo recomendado es **500**, por lo que se necesita forzar el cambio).
- **WPNAV_ACCEL_Z**: Establecer a **500**.
- **WPNAV_SPEED**: Establecer a **1000**.
- **WPNAV_SPEED_DN**: Establecer a **300**.
- **WPNAV_SPEED_UP**: Establecer a **550**.
- **WPNAV_JERK**: Establecer a **10**.

2. Parámetro de Seguridad (DISARM_DELAY):

- Configura **DISARM_DELAY** en **10** para prevenir que el dron desarme los motores antes del despegue, lo que ofrece un margen de seguridad durante las operaciones en tierra.

Con estos ajustes configurados, la **Pixhawk 6C** estará optimizada para el uso en un enjambre de drones, incluyendo la capacidad de recibir correcciones RTK y tener un control preciso y seguro durante el vuelo.

10.Referencias

Kallenborn, Z., Kallenborn, Z., & Kallenborn, Z. (2024, 20 marzo). Swarm Clouds on the Horizon? Exploring the Future of Drone Swarm Proliferation. *Modern War Institute* -. <https://mwi.westpoint.edu/swarm-clouds-on-the-horizon-exploring-the-future-of-drone-swarm-proliferation/>

Guarnera, C. (2024, 13 enero). *Mastering the Sky: The Revolutionary Potential of Drone Swarms in 2024*. Blue Falcon Aerial. <https://www.bluefalconaerial.com/mastering-the-skies-the-power-of-drone-swarm-technology/>

Arranz, R., Carramiñana, D., De Miguel, G., Besada, J. A., & Bernardos, A. M. (2023). Application of Deep Reinforcement Learning to UAV Swarming for Ground Surveillance. *Sensors*, 23(21), 8766. <https://doi.org/10.3390/s23218766>

Kumari, N., Lee, K., Barca, J. C., & Ranaweera, C. (2024). Towards Reliable Identification and Tracking of Drones Within a Swarm. *Journal Of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2). <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02115-1>

Kumari, N., Lee, K., Barca, J. C., & Ranaweera, C. (2024). Towards Reliable Identification and Tracking of Drones Within a Swarm. *Journal Of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2). <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02115-1>

Investigating the survivability of drone swarms with flocking and swarming flight patterns using Virtual Reality. (2019, 1 agosto). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8843173>

Piciarelli, C., & Foresti, G. L. (2020). Drone swarm patrolling with uneven coverage requirements. *IET Computer Vision*, 14(7), 452-461. <https://doi.org/10.1049/iet-cvi.2019.0963>

Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA). (s.f.). *Drones* <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones>

Unión Europea. (2019). Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión, de 12 de marzo de 2019, sobre sistemas de aeronaves no tripuladas y operadores de terceros países de

sistemas de aeronaves no tripuladas. Diario Oficial de la Unión Europea, L152, 45-71.

<https://www.boe.es/doue/2019/152/L00045-00071.pdf>

Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea. (s.f.). Predefined risk assessment

(PDRA). *EASA*. Recuperado el 14 de diciembre de 2024, de

<https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/specific-category-civil-drones/predefined-risk-assessment-pdra>

Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA). (n.d.). *Guía de presentación de solicitudes de*

autorización para la operación de sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto

(RPAS) (UAS-OPR-P01-GU04, Ed. 07). Recuperado de

https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/UAS-OPR-P01-GU04_Ed.07_Guia.presentacion.autorizacion.pdf

Aguilera, L. (2024, September 30). *EU Drones Laws 2024 : The Essential Guide*. Dronavia.

<https://www.dronavia.com/2024/06/10/eu-drones-laws-2024/?v=12470fe406d4>

QGC. (n.d.). QGroundControl - Drone Control. <https://qgroundcontrol.com/>

Skybrush Server - Skybrush open-source Drone show software. (n.d.).

<https://skybrush.io/modules/server/>

Skybrush Live - Skybrush open-source Drone show software. (n.d.).

<https://skybrush.io/modules/live/>

Skybrush Studio - Skybrush open-source Drone show software. (n.d.).

<https://skybrush.io/modules/studio/>

Skybrush Viewer - Skybrush open-source drone show software. (n.d.).

<https://skybrush.io/modules/viewer/>

Skybrush Sidekick - Skybrush open-source Drone show software. (n.d.).

<https://skybrush.io/modules/sidekick/>

Skybrush firmware - Skybrush Open-source Drone Show Software. (n.d.).

<https://skybrush.io/modules/firmware/>

PiXHawk 6C. (n.d.). Holybro Store. [https://holybro.com/products/pixhawk-](https://holybro.com/products/pixhawk-6c?variant=42420293402813)

[6c?variant=42420293402813](https://holybro.com/products/pixhawk-6c?variant=42420293402813)

H-RTK F9P GNSS Series (IST8310 Compass). (n.d.). Holybro Store.

<https://holybro.com/products/h-rtk-f9p-gnss-series?variant=41466787201213>

SIK Telemetry Radio V3. (n.d.). Holybro Store. [https://holybro.com/products/sik-telemetry-](https://holybro.com/products/sik-telemetry-radio-v3?variant=42801817485501)

[radio-v3?variant=42801817485501](https://holybro.com/products/sik-telemetry-radio-v3?variant=42801817485501)

Power Distribution Board (PDB) 60A. (n.d.). Holybro Store.

<https://holybro.com/products/power-distribution-board-pdb?variant=41590962684093>

RT-AX53U|Routers WiFi|ASUS España. (n.d.). ASUS España.

<https://www.asus.com/es/networking-iot-servers/wifi-routers/asus-wifi-routers/rt-ax53u/>