

**DEPARTAMENTO ELECTRONICA DE LA FACULTAD REGIONAL MENDOZA
UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL.**



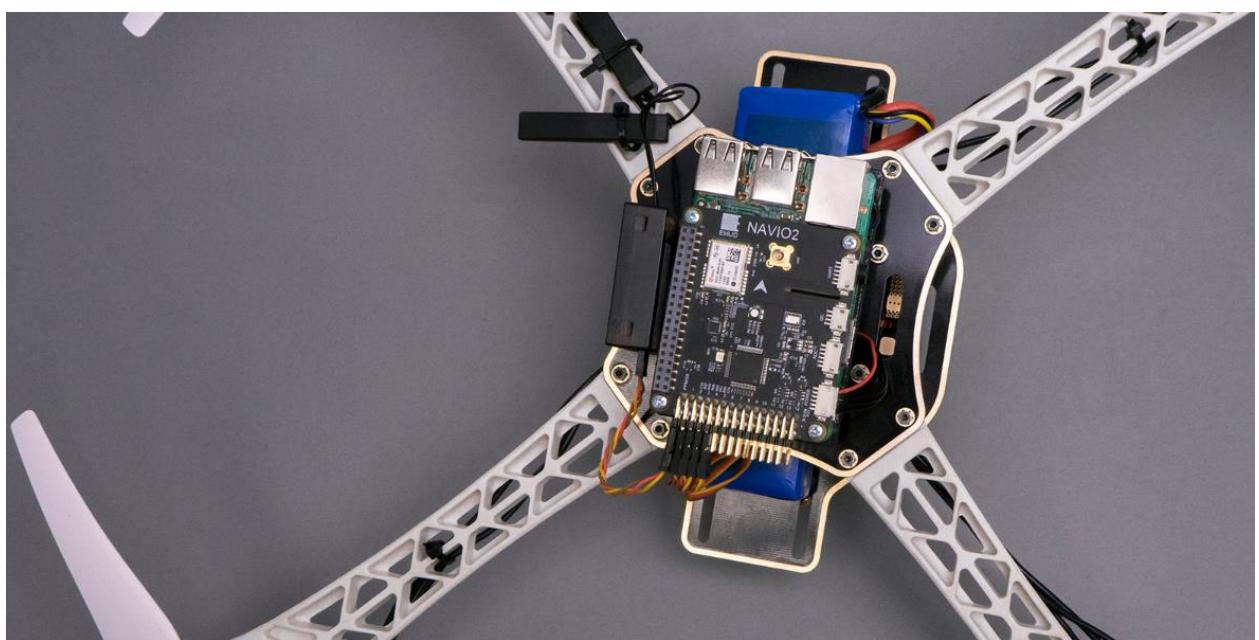
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Facultad Regional Mendoza

Departamento de Electrónica

Grupo de Investigación GridTics UTN-FRM

**“PUESTA EN MARCHA DE MULTICÓPTERO CON
AUTOPILOTO DE CÓDIGO ABIERTO (PMMA)”**



Alumno: Alexander Sergio Denis Santos

Legajo: 37210

AÑO 2022

ÍNDICE

1.0	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	2
2.0	DESCRIPCIÓN Y GENERALIDADES DE UN MULTICÓPTERO	2
2.1	¿Qué es un multicóptero?	2
2.2	Funcionamiento de los motores y maniobras básicas	4
2.3	Clasificación de multicópteros	7
3.0	HARDWARE	12
3.1	Descripción general	12
3.2	Hexacóptero DJI Flame Wheel 550	13
3.2.1	Componentes	14
3.2.2	Herramientas necesarias para el montaje	15
3.2.3	Preparación para el montaje	15
3.2.4	Descripción del montaje	18
3.3	Sistema Embarcado	21
3.3.1	Autopiloto o controladora de vuelo	21
3.3.2	Sistema embarcado (Autopiloto)	23
3.3.3	Montaje	27
3.3.4	Conexión ESC y motores	28
3.4	Módulos de Telemetría	31
3.4.1	Radio de Telemetría SiK	31
3.4.2	Radio Telemetría HT0X – 915 MHz	32
3.4.3	Conexión de las Radios de Telemetría	34
3.4.4	Montaje	35
3.5	Sistema Radio Control (RC)	36
3.5.1	Sistema RC DT7&DR16 2.4 GHz	36
3.5.2	Conexión del Receptor DR16 al sistema de control de vuelo.....	37
3.5.3	Montaje Receptor DR16.....	38
3.6	Antena del Receptor GNSS.....	39
3.6.1	Montaje.....	40
3.7	Sistema de Alimentación	41
3.7.1	Módulo de Alimentación	41
3.7.2	Montaje Módulo de Alimentación	42
3.7.3	Baterías	43
3.7.4	Baterías LiPo 4S 4000 mAh	46
3.8	Cargador de Baterías SKYRC AC/DC 100 W	47
3.8.1	Modo de operación	48
3.8.2	Proceso de carga	50
4.0	SOFTWARE/FIRMWARE	51
4.1	Firmware Autopiloto	52
4.1.1	¿Por qué Ardupilot?	52
4.1.2	Configuración Raspberry Pi	53
4.1.3	Instalación y ejecución	54
4.1.4	Configuración del enlace a la GCS	58
4.2	Software GCS – Estación de Control Terrestre	60
4.2.1	QGroundControl	62
4.2.2	Inicio rápido de QGroundControl	62
4.2.3	Configuración y calibración del vehículo (Setup View)	64
4.2.4	Airframe (Fuselaje)	66
4.2.5	Radio	67
4.2.6	Calibración ESC (Controlador Electrónico de Velocidad)	69
4.2.7	Sensores	73
4.2.8	Flight Modes (Modos de Vuelo)	75
4.2.9	Power (Alimentación)	75
4.2.10	Motors (Motores)	76
4.2.11	Safety, Tuning, Camera y Parameters	77
5.0	PRUEBAS DE VUELO	77
5.1	Comprobaciones previas	78
5.2	Controles de vuelo	79
5.3	Modos de vuelo.....	86
5.4	Prueba de vuelo	89
5.5	Registro de vuelo	91
5.6	Datos de vuelo	92
5.6.1	Herramientas para el análisis de registros	92
5.6.2	Registros de vuelo en QGroundControl	96
5.6.3	UAV LogViewer	102
5.6.4	Creación de archivos KMZ con Mission Planner	107
6.0	CONCLUSIONES	110
7.0	BIBLIOGRAFÍA	111

1.0 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Los UAS (Unmanned Aerial System - Sistemas Aéreos No Tripulados) se desarrollaron como forma de análisis a pequeña escala de una aeronave a estudiar, que ha derivado a una forma de observación y control aéreo de múltiples ámbitos, como la agricultura, ingeniería civil, seguridad, rescate marítimo, cine, fotografía, música o la simple finalidad recreativa. Desafortunadamente son pocos los UAS que permitan a un desarrollador de aplicaciones específicas trabajar directamente sobre un autopiloto de código abierto, operable y de ejecución inmediata.

En función de lo descrito en el apartado anterior, el presente proyecto pretende desarrollar la documentación necesaria para la puesta en marcha de un multicóptero con autopiloto de código abierto listo para el desarrollo de aplicaciones avanzadas, lo que permitirá al usuario centrarse en la creación de aplicaciones específicas para cumplir con sus objetivos. Por otra parte, la documentación detallada del presente proyecto permitirá al lector poseer nociones básicas para el montaje de un multicóptero y un procedimiento orientativo a seguir para su funcionamiento.

2.0 DESCRIPCIÓN Y GENERALIDADES DE UN MULTICÓPTERO

2.1 ¿Qué es un multicóptero?

Un multicóptero o multirrotor es un helicóptero con más de dos rotores. Nombres tales como cuadricóptero, hexacóptero y octocóptero se utilizan normalmente para referirse a multicópteros de 4, 6 y 8 hélices respectivamente.

Componentes fundamentales

En la Figura 1 se muestra el esquema genérico de un **multicóptero** o **dron** (drone en inglés), donde podemos ver las partes fundamentales y que nos permitirán hacernos una idea más precisa del funcionamiento de nuestro proyecto.

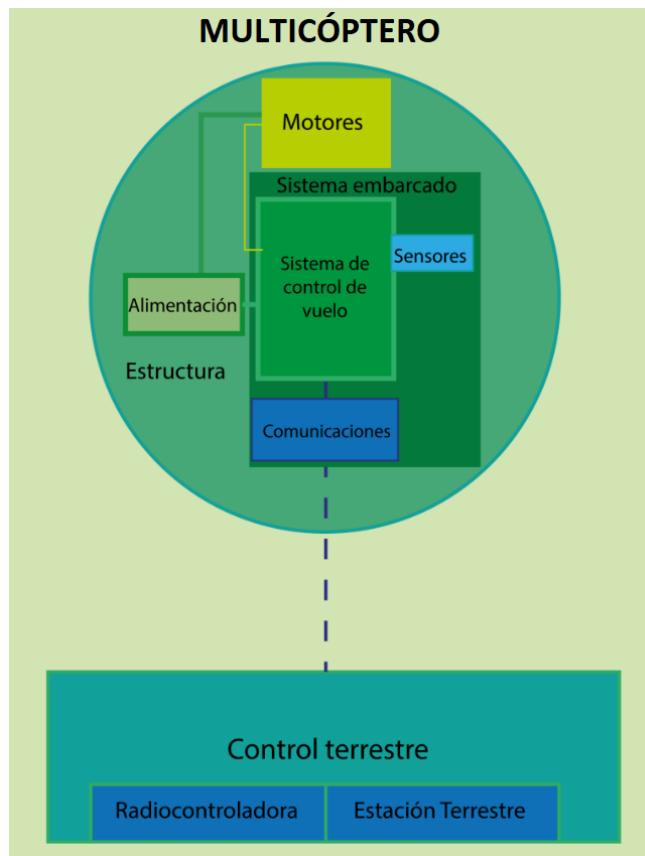


Figura 1 – Esquema genérico de un multicóptero

Se describirán brevemente los distintos componentes del dron, pero se desarrollarán más detalladamente en los próximos apartados.

- ✓ **Estructura:** encargada de acoger el resto de los elementos, mantenerlos protegidos y unidos.
- ✓ **Motores:** ejecutan órdenes de movimiento mediante la velocidad de giro de las hélices o propulsión en algunos casos, para elevar y trasladar la nave.
- ✓ **Control Terrestre:** equipo encargado de la supervisión de vuelo y monitorización del vuelo. En este segmento se reciben los datos tomados por la aeronave, a la par de ser posible enviar nuevas órdenes o modificar las iniciales. Este equipo puede tomar dos formas no excluyentes:
 - **Radiocontroladora o Radio Control:** se trata del mando a distancia que hace uso de ondas de radio para comunicar órdenes directas al dron, tales como velocidad de ascenso/descenso, órdenes de desplazamiento, velocidad, armado/desarmado de motores, etc.
 - **Estación Terrestre (Ground Station):** hace la función de radio control y se le puede añadir algún tipo de procesamiento de alto nivel, como por ejemplo los datos recogidos por una cámara. Es el centro de coordinación, análisis y ejecución de un dron.

- ✓ **Sistema Embarcado:** se encarga de todos los procesos de información, control y comunicación de la nave. Este componente engloba:
 - **Sensores:** envían información a la nave y al segmento terrestre. Algunos de estos son los giroscopios, acelerómetros, barómetros, GNSS y/o magnetómetros. Las antenas se han representado en el esquema como Comunicaciones.
 - **Comunicaciones:** se encargan de resolver el intercambio de información y órdenes entre la aeronave y el segmento tierra: receptores/transmisores de radio, antenas, etc.
 - **Sistema de Control de Vuelo:** es el encargado de mantener la orientación o actitud, altura, estabilidad, coordinación de motores, etc. En sistemas reales, esto puede desdoblarse en dos partes: por una parte, el **procesador de vuelo** que hace la función de procesador de la nave; es decir, convierte la aeronave en una suerte de ordenador en miniatura con la capacidad de volar y ejecutar movimientos. Por otra parte, el **hardware del autopiloto** que se trata de un puente entre el procesador de vuelo y los sensores y motores del dron. En ocasiones incluye algunos de los sensores más básicos.
- ✓ **Alimentación:** energía para alimentar todos los componentes del dron.

En cuanto al funcionamiento del multicóptero, pese a no ser pilotado por un ser humano dentro de la propia nave, sí que debe ser controlada de alguna forma: bien mediante radiocontrol o mediante un control de vuelo programado. Este modo automático es supervisado por la Estación de Control Terrestre. Desde este punto, podemos configurar el dron, enviarle órdenes o recibir información desde ella (posición GNSS, altura, velocidad, etc.). También sirve como punto de referencia de la nave, en caso de necesidad de regreso urgente o de haber finalizado la misión de vuelo.

La nave se guiará a través de los datos tomados mediante sus sensores y antenas (GNSS, barómetro, IMU, etc.) y actuará en consecuencia de su estado de vuelo y su programación de control de vuelo, o bien en consecuencia de las órdenes enviadas desde el control por radio (mando a distancia). Independientemente de cuál de los dos dominios tome, toda orden o ejecución de movimiento pasará por el **autopiloto**. Esta herramienta nos facilita enormemente el manejo de la aeronave, ya que traduce nuestros movimientos o cambios dinámicos mediante la aceleración o desaceleración de los distintos motores de la nave y la lectura de los datos tomados, para que así dicho movimiento se realice correctamente. En resumen, nos permite centrarnos en el movimiento total que queremos realizar, y no en la necesidad de controlar los motores uno a uno.

Las órdenes de vuelo y/o los datos pueden ser enviados mediante diversos métodos: Bluetooth, WiFi, radio, etc.

2.2 Funcionamiento de los motores y maniobras básicas

Un multicóptero es un vehículo aéreo mecánicamente sencillo cuyo movimiento se controla solamente mediante la aceleración o ralentización de los sistemas de rotor (motor y hélice) que

generan el empuje hacia abajo. Para el análisis de las maniobras básicas, utilizaremos como ejemplo un multicóptero de 4 motores o mejor dicho un Cuadricóptero.



Figura 2 – Formato común de Cuadricóptero

La altitud se controla mediante la aceleración o ralentización de todos los motores en igual intensidad.

Ejes de rotación de una aeronave: Pitch, Roll y Yaw

Son tres ángulos equivalentes a tres maniobras consecutivas. Dado un sistema de tres ejes fijos en el aeroplano, llamados eje de guiñada (yaw en inglés), de cabeceo (pitch) y de alabeo (roll), serán las tres rotaciones principales. En la siguiente gráfica se observa el comportamiento de pitch-roll-yaw.

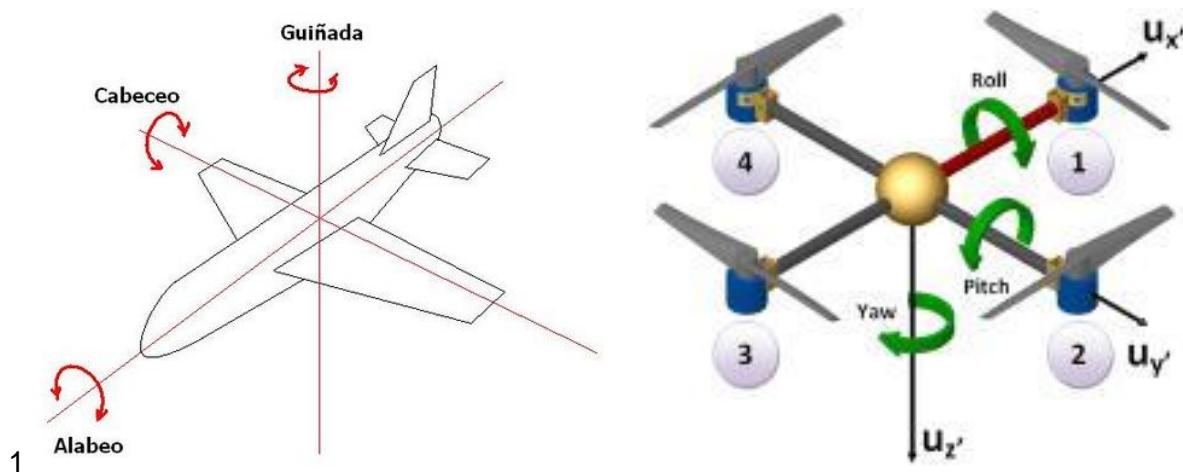


Figura 3 – Definición de ángulos Yaw, Pitch y Roll

Los cuadricópteros pueden ser de los 2 tipos más comunes "X" o "+". Todos los brazos tienen la misma longitud y la electrónica se encuentra ubicada en el centro de la estructura. La diferencia entre una estructura en "X" y otra en "+" radica en lo que establecemos como "adelante-atrás-derecha-izquierda"

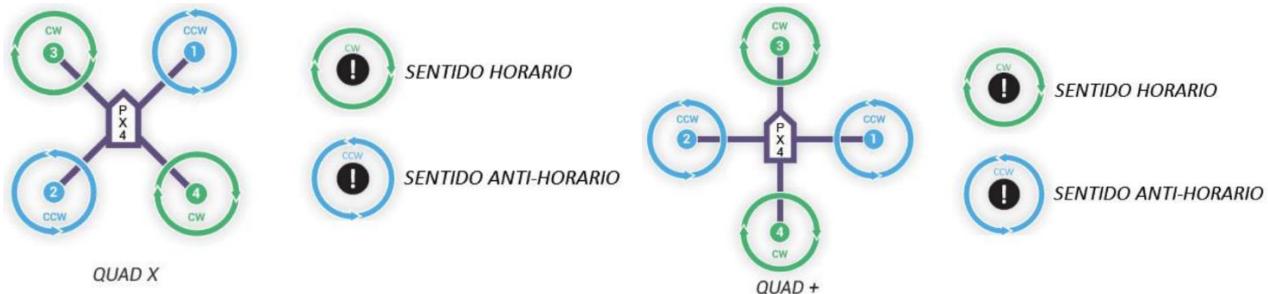


Figura 4 – Configuraciones QUAD "X" y QUAD "+"

En el dron, dos de los motores opuestos (1-2) giran en sentido antihorario CCW mientras que los dos restantes (3-4) lo harán en sentido horario CW.

De esta manera el momento de inercia producidos por efectos giroscópicos y aerodinámicos resultante en el centro de la estructura se anulará mutuamente y la aeronave no se moverá.

Potencia de los motores para maniobras básicas

Tomando como ejemplo el cuadricóptero de la Figura 1 (QUAD "X"), para desplazarse hacia adelante se deben acelerar los dos motores traseros y ralentizar los dos delanteros. En el caso contrario, para retroceder se deben acelerar los motores delanteros y ralentizar los traseros. Del mismo modo, para desplazarse hacia un lado se deben ralentizar los motores del mismo lado y acelerar los del lado opuesto. Para desplazarse a la derecha se ralentizan los motores derechos y se aceleran los izquierdos, y viceversa para el desplazamiento hacia la izquierda; esto se conoce como "alabeo" (o balanceo). Los giros del multicóptero o "guiñada" (cambio de la orientación del frente) a derecha o izquierda se producen por la aceleración de dos motores ubicados en diagonal (en esquinas opuestas) y ralentización de los otros dos.

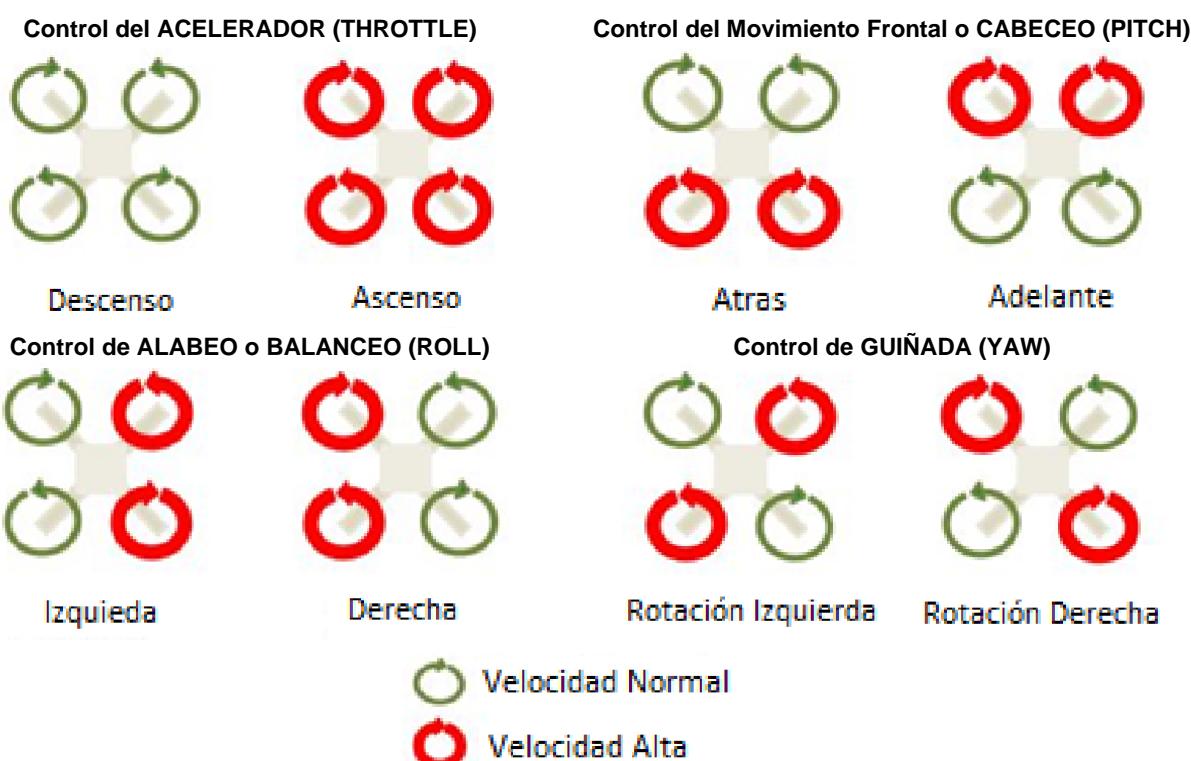


Figura 5 – Potencia de motores para maniobras en Cuadricóptero

En todos los casos es el controlador de vuelo (u ordenador a bordo) quien coordina automáticamente cada rotor y su intensidad para que el multicóptero respete las órdenes enviadas desde el radio control. Siendo los multicópteros aerodinámicamente inestables, también es tarea del controlador de vuelo mantener la estabilidad combinando los datos recibidos de giroscopios y acelerómetros a bordo para mantener una estimación precisa de la posición y orientación del multicóptero.

2.3 Clasificación de multicópteros

En esta sección vamos a explorar los diversos tipos de multirrotores y a analizar los pros y contras de cada configuración.

Hay muchos tipos de multirrotores. Por lo general, se clasifican y se nombran según la cantidad de sistemas de rotor (motor y hélice) que poseen. Por ejemplo, un multirrotor con tres motores es llamado tricóptero.

El número de motores y configuración de cada tipo de multirrotor tienen aparejado algunas ventajas y desventajas en lo que respecta al rendimiento. Por ejemplo, cuantos más motores, más potencia y más capacidad de sustentación, pero también mayor consumo de baterías lo que en definitiva implica menor autonomía o tiempo de vuelo. Obviamente motores adicionales también implican componentes adicionales (variadores de velocidad, baterías, hélices, etc.), peso y presupuesto adicionales.

Bicóptero (2 motores)

El bicóptero cuenta con dos rotores capaces de repositionarse mediante servos para definir la dirección de movimiento.



Figura 6 - Bicóptero

Es uno de los multicópteros más baratos ya que utiliza sólo dos motores y dos servos, pero es la plataforma menos estable y más difícil de controlar. Es también el menos robusto y con menor potencia de elevación dado que cuenta con sólo 2 motores.

Tricóptero (3 motores)

Un tricóptero tiene tres motores, dispuestos en "T" o "Y" a 120° de separación, siendo esta última la configuración más común. Las dos hélices delanteras pueden apuntar hacia los lados o ligeramente

hacia adelante, el tercer rotor está ubicado en la parte trasera y cuenta con un servo que permite inclinarlo lateralmente para definir la orientación.

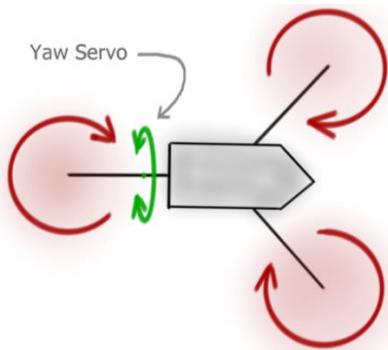


Figura 7 – Tricóptero configuración

Es una configuración relativamente barata ya que sólo requiere 3 motores. Aunque se necesita un servo, estos son generalmente más baratos que los motores por lo que el conjunto termina siendo más económico.

Es más inestable que el resto de las configuraciones con más motores, pero permite realizar “guiñadas” o giros laterales con mayor eficiencia y facilidad lo que contribuye en definitiva a un mayor rango de acrobacias.

Cuadricóptero (4 motores)

Un cuadricóptero típico se compone de un marco simétrico con 4 motores montados en 4 brazos ubicados a 90°. Esta configuración es la más popular, mecánicamente simple y fácil de entender.

Las hélices se disponen en dos grupos, las **CW** (clockwise o en el sentido de las agujas del reloj) y las **CCW** (counterclockwise o en el sentido opuesto a las agujas del reloj).

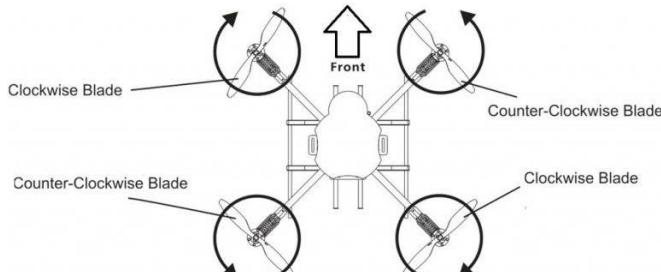


Figura 8 – Cuadricóptero configuración

Hay 2 configuraciones según la orientación del frente: “x” o “+”. En la imagen superior observamos la configuración “x” que es popular para fotografía aérea y vista en primera persona (FPV) para evitar que las hélices caigan en la visión de la cámara. La cámara va montada en el centro del chasis y apunta hacia la nariz. Por otro lado, la configuración “+” se suele usar en el ámbito deportivo debido a su similitud con un avión. Con esta configuración es más fácil conocer en todo momento la nariz y volar con la orientación correcta.

Y4 (4 motores)

Es similar al tricóptero, pero sin el servo de cola. Hay dos hélices y dos motores normales en el frente, en brazos separados y dos motores coaxiales en la parte trasera montados en un solo brazo. Mecánicamente es más simple que un tricóptero debido a la ausencia del servo.

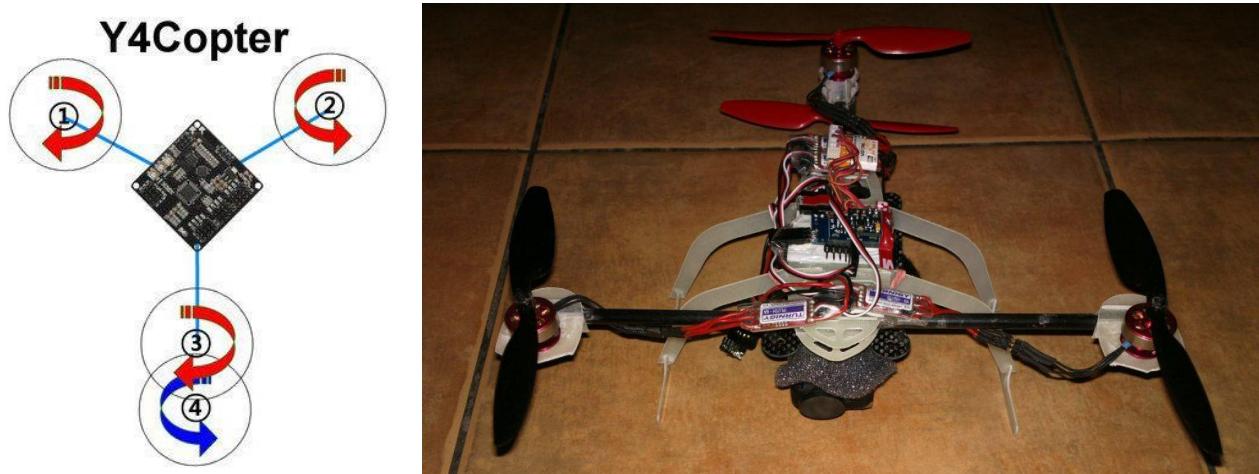


Figura 9 – Tricóptero configuración Y4

Mientras que pesan casi lo mismo que los tricópteros comunes, tienen aproximadamente un tercio más de potencia de elevación y por lo general son más confiables al evitar los potenciales problemas con el servo de cola.

Cuadricóptero Cola en V y Cola en A (4 motores)

Las colas en V y las colas en A son básicamente cuadricópteros con los motores delanteros normalmente situados mientras que los traseros están colocados más próximos con sus ejes inclinados respecto de la vertical, bien hacia afuera (cola en V) o bien hacia adentro (cola en A). Son una mezcla entre un cuadricóptero y un tricóptero y son muy parecidos a la configuración Y4.

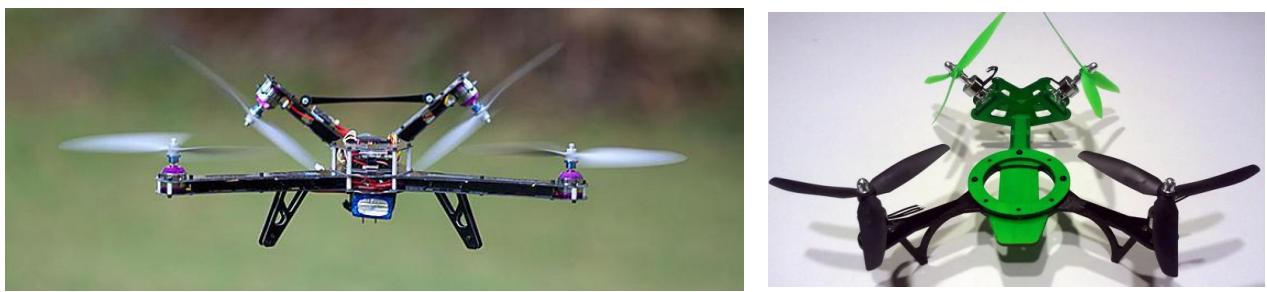


Figura 10 - Cuadricóptero configuración Cola en V y Cola en A

No es una configuración popular porque proporciona poca eficacia a la potencia debido a la interferencia de los flujos de aire de las dos hélices traseras, pero la verdad es que son diseños bonitos y proporcionan una mejor visibilidad de la orientación.

Pentacóptero

Con 5 motores. No hay mucha información al respecto porque no es una configuración popular. Una ventaja evidente es que situando los dos brazos delanteros a ambos lados de la cámara FPV, la visión es óptima.



Figura 11 – Pentacóptero configuración

Hexacóptero (6 motores)

Un hexacóptero tiene 6 motores montados en 6 brazos dispuestos a 60° en un chasis simétrico con tres conjuntos de hélices tipo CW (sentido horario) y CCW (sentido anti-horario).

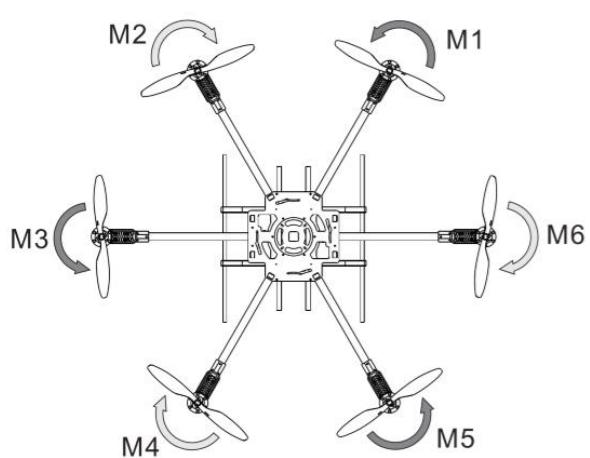


Figura 12 – Hexacóptero configuración

Son muy parecidos a los cuadricópteros, pero proporcionan mayor capacidad de carga gracias a los motores extra. También tienen una ventaja debido a esta redundancia y es que, en caso de fallo de uno de los motores, pueden a menudo aterrizar evitando daños a valiosas cámaras de vídeo o fotografía. Su desventaja es que tienden a ser más grandes, caros y complicados de construir.

Hexacóptero configuración Y6

Tienen 6 motores pero situados en un chasis en Y con dos motores en cada brazo uno encima del otro girando en sentido contrario, similar a un tricóptero, pero sin necesidad de un servo.

Este tipo de multicóptero puede ser construido de una forma muy compacta y con una capacidad de carga similar a la de un hexacóptero, sin embargo, esta configuración no es muy eficiente debido a la disposición coaxial de los motores.



Figura 13 – Hexacóptero configuración Y6

Octocóptero (8 motores)

Un octocóptero típico tiene ocho motores al mismo nivel, cuatro de ellos girando en un sentido y los otros cuatro en el otro. Se puede decir que son una versión mejorada de los hexacópteros, con más capacidad de carga y mayor redundancia. Son los drones más utilizados para fotografía aérea profesional debido a que pueden cargar equipo de filmación pesado.



Figura 14 – Octocóptero configuración

Octocóptero configuración X8

Los ocho motores están montados en cuatro brazos, dos en cada brazo con los ejes coaxiales y girando en sentido contrario. Similar a la configuración Y6.



Figura 15 – Octocóptero configuración X8

3.0 HARDWARE

3.1 Descripción general

Los elementos de hardware que componen un dron o multicóptero son muy variados según el uso al que se destinan, pero generalmente están compuestos por una serie de elementos fundamentales. En nuestro caso, se trata de un hexacóptero con autopiloto de código abierto que puede representarse de la siguiente forma.

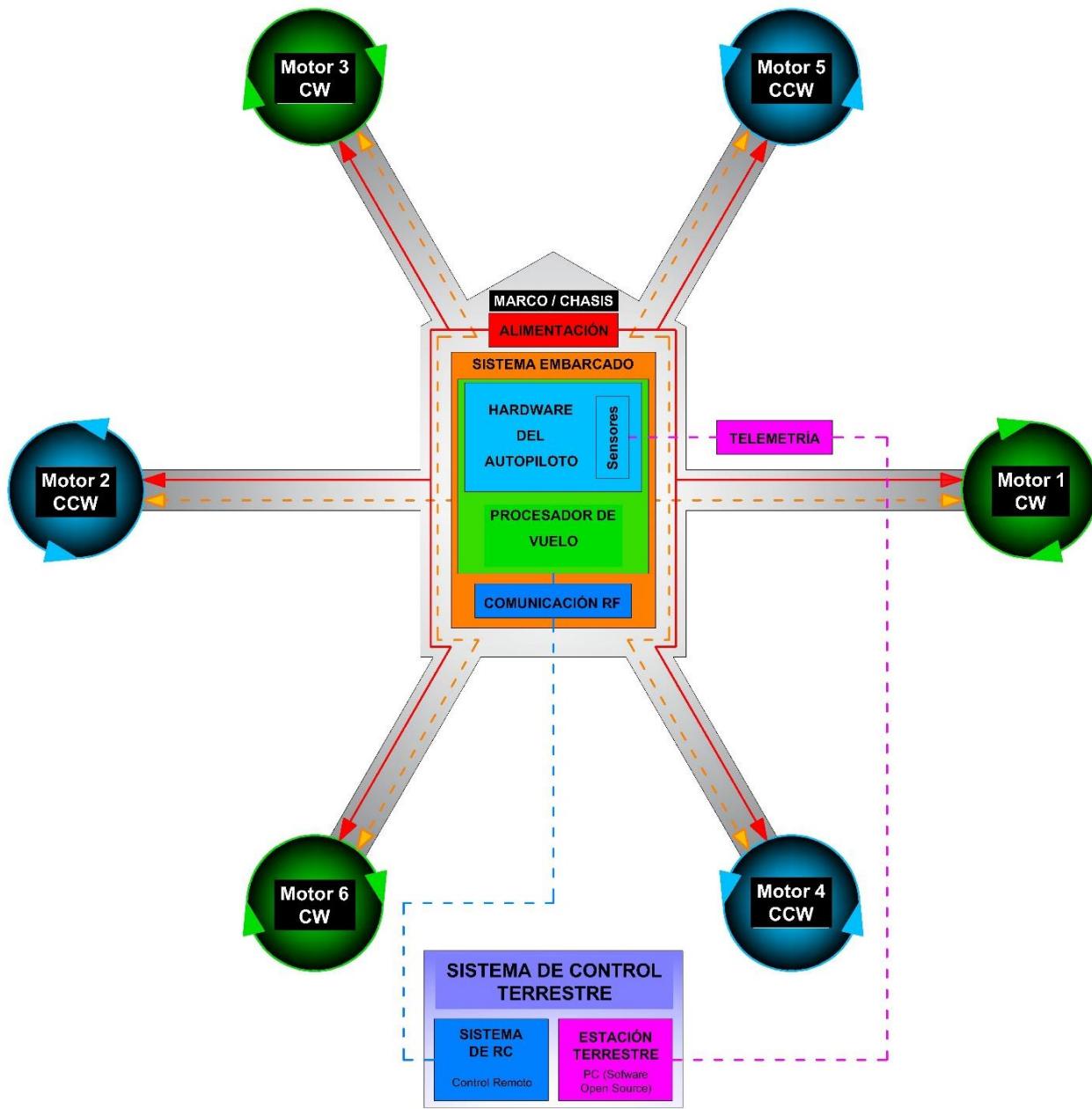


Figura 16 – Componentes de Hexacóptero con Autopiloto de Código Abierto

En primera instancia se necesita un *marco* o *chasis*, podría decirse que es el esqueleto sobre el cual se van a colocar el resto de los componentes.

A continuación, se necesita un grupo de propulsión, formado en este caso por 6 motores con sus respectivas hélices. Estos motores deben poder variar la potencia para realizar distintas maniobras

y eso hace que sea necesario un nuevo elemento por cada motor: el variador o ESC (Electronic Speed Controller) que permitirá variar la velocidad de giro de los motores.

Además, se necesitará una fuente de *alimentación*, más precisamente una batería que suministre corriente al aparato durante el vuelo y una forma de que esa energía llegue a todas partes. Además, es preciso que la potencia y tensión suministrada a cada elemento sea la adecuada, según sus especificaciones. Para ello debemos emplear una placa pdb (power distribution board) o módulo de alimentación cuyo único fin es regular los voltajes que llegan a cada parte del dron.

Además, hay que sumarle una variedad de sensores que le permiten al dron interactuar con el entorno y recibir información sobre él, siendo los más importantes los siguientes:

- Un *módulo GPS* que permita saber en todo momento donde se encuentra el aparato.
- Un *sensor barométrico* para conocer la altura a la que se está volando.
- Una *unidad de movimiento inercial (IMU)* que permitirá saber la actitud del dron y que incluya una *brújula* (orientación).

Por último, se necesita un dispositivo controlador de vuelo (procesador de vuelo + hardware del autopiloto), que se encargue de tomar todas las decisiones y recibir la telemetría de los sensores.

El desarrollo del proyecto “**Puesta en Marcha de Multicóptero con Autopiloto de Código Abierto (PMMA)**” se llevará a cabo con una serie de componentes de hardware que detallaremos a continuación. Cabe aclarar que se dispone de un Multicóptero del fabricante DJI con su propia controladora de Vuelo DJI NAZA Lite, pero en este trabajo, se procederá a reemplazar la controladora original por el conjunto NAVIO2+Raspberry Pi que constituye una controladora de vuelo de código abierto.

Componentes:

- *Marco o Chasis*: Hexacóptero DJI Flame Wheel 550.
- *Sistema Embarcado*:
 - *Procesador de Vuelo*: Raspberry Pi 3 Model B+.
 - *Hardware del Autopiloto*: NAVIO2 (Autopiloto HAT para Raspberry Pi).
- *Módulos de Telemetría*: Radio Telemetría HT0X.
- *Sistema Radio Control (RC)*: Sistema RC DT7&DR16.
- *Antena del Receptor GNSS*.
- *Sistema de Alimentación*: Batería LiPo 4S Gens Ace 4000 mAh y Módulo de Alimentación.
- *Cargador de Baterías*: SKYRC D100 AC/DC Dual Balance Charger/Discharger.

3.2 Hexacóptero DJI Flame Wheel 550

El Flame Wheel 550 (F550) es un multicóptero (hexacóptero) diseñado para todos los pilotos aficionados o profesionales. Con el sistema de piloto automático DJI WKM o NAZA, puede lograr elementos de vuelo estacionario, de crucero, incluso rodante y otros. Se puede aplicar para entretenimiento, fotografía aérea, FPV y otras actividades de aeromodelismo.



Figura 17 - Hexacóptero DJI F550

3.2.1 Componentes

Top Board 550FBT x1	Bottom Board 550FBB x1
Frame Arms 550FAC x3	Frame Arms 550FAW x3
Motors CW x3	Motors CCW x3
Propeller Pairs x4	ESC x6
Screws 550-M3x8 x24	Screws 550-M2.5x6 x36

Propeller Removal Clamp ×1 	Magic Strap 550MSX ×1 Battery Band 550BBX ×11 Power Line Pair 550PLP ×1
--	--

3.2.2 Herramientas necesarias para el montaje

Herramienta	Uso
Llave hexagonal de 2,0 mm.	Para la instalación de bastidores (marcos) y motores.
Pegamento para tornillos.	Para tornillos de fijación.
Sujetacables de nailon, tijeras y alicates de corte diagonal.	Para fijar receptor, controlador y otros módulos.
Cinta adhesiva de espuma de doble cara (Cinta 3M).	Para fijar receptor, controlador y otros módulos.
Soldador y cables.	Para conectar los cables de alimentación de los ESC a la placa inferior.

3.2.3 Preparación para el montaje

Descripción del montaje del motor

Los motores que vamos a utilizar son los DJI 2312E 960RPM del kit Flame Wheel 550 (DJI), los cuales se muestran a continuación.



Figura 18 – Motor DJI 2312E

En cuanto a las especificaciones, cada motor posee un empuje máximo de 850g a nivel del mar (14.8V máximo), con un peso máximo de despegue recomendado de 350-400g cada uno. Su rango de temperaturas de trabajo comprende entre los -10°C y los 40°C.

Para tener en cuenta:

- El tamaño del tornillo es M3. Montar los motores utilizando los tornillos adecuados.
- Tenga en cuenta la profundidad de la rosca y el tamaño de los tornillos. El uso de tornillos demasiado largos o grandes puede dañar el motor.

ESC Electronic Speed Controller

Cada motor es controlado por un Controlador de Velocidad Electrónico ESC (Electronic Speed Controller), más específicamente el DJI 420 Lite, que se muestra a continuación.

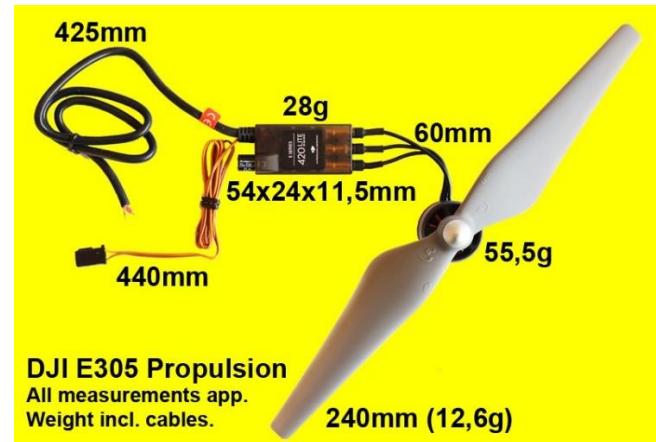


Figura 19 – ESC DJI 420 Lite

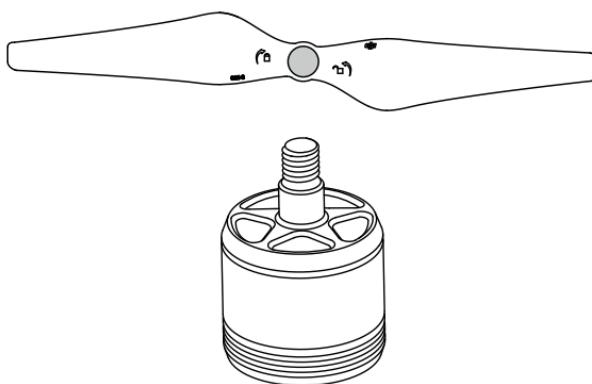
El DJI 420 Lite ESC (Electronic Speed Controller, Controlador de Velocidad Electrónico o variador) recibe corriente y tensión (CC) desde el circuito electrónico de alimentación y entrega a los motores una tensión y corriente trifásica (CA). Observamos que desde el ESC sale además un cable doble de color amarillo/anaranjado (señal) y marrón (GND o tierra); este se encargará de trasladar la señal de control desde el autopiloto hasta el ESC. Finalmente, el ESC procesará esta señal de control y transformará la alimentación (CC) en una corriente trifásica (CA).

Descripción del montaje de la hélice

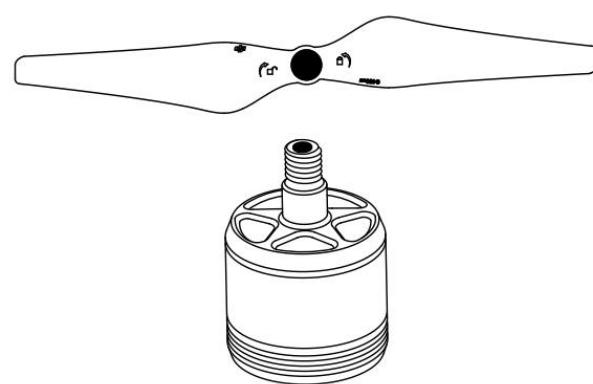
Fijar la hélice con tuerca plateada sobre el motor que gira en sentido contrario a las agujas del reloj (CCW).

Fijar la hélice con tuerca negra sobre el motor que gira en el sentido de las agujas del reloj (que tiene una hendidura en el tornillo).

Tuerca de plata (9450)



Tuerca negra (9450 CW)



Bloqueo: apretar la hélice girándola en esta dirección.



Desbloqueo: Retirar la hélice girándola en esta dirección.

ESC y descripción del cableado del motor

El fabricante especifica los siguientes pasos para el correcto montaje de los motores y sus respectivos ESC.

- 1- Suelde cada ESC a las almohadillas de alimentación en la placa inferior como se muestra en la figura a continuación. Asegúrese de que la soldadura esté firmemente unida a las

almohadillas de alimentación y que no haya posibilidad de un cortocircuito. El cable de alimentación es un cable de alimentación coaxial. No dañe el protector del cable rojo para evitar cortocircuitos. El núcleo rojo del cable de alimentación coaxial es positivo y la capa de protección del cable de alimentación coaxial es negativa. Asegúrese de soldarlos correctamente a la longitud adecuada (los cables deben ser lo suficientemente largos para alcanzar el punto de soldadura, mirar hacia afuera y no deben amontonarse frente al punto de soldadura).

- 2- Conecte el cable de señal (2 Hilos) a su controlador. El hilo naranja del cable de señal es para la señal de control; el hilo marrón del cable de señal es para GND.
- 3- Conecte el motor al ESC. Pruebe el motor y asegúrese de que la dirección de rotación de cada motor sea correcta. De lo contrario, cambie la posición de dos cables de cualquiera de los 3 cables que conectan el motor al ESC para cambiar la dirección de rotación.

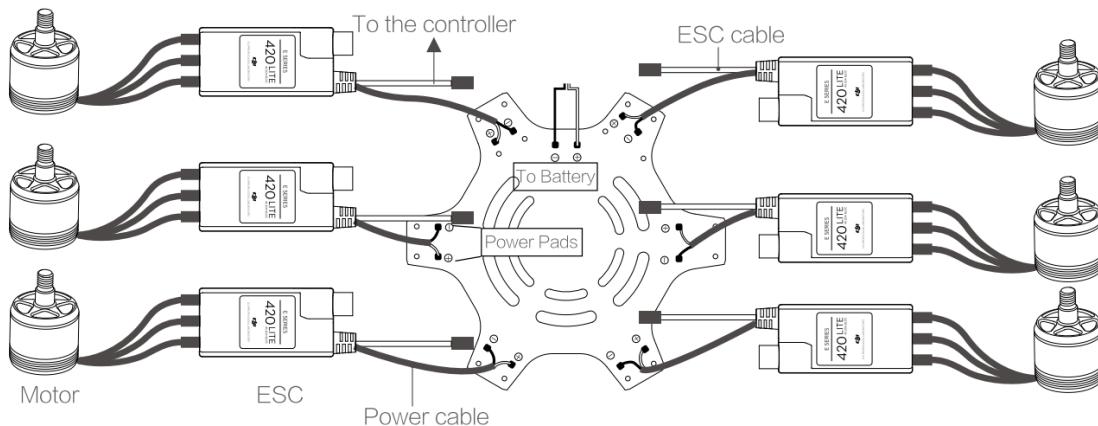


Figura 20 – Montaje de motores y ESC

Para tener en cuenta:

- Suelde los ESC a las almohadillas de alimentación en la placa inferior como se muestra en la figura.
- Utilice cualquier método de aislamiento en todos los puntos de soldadura. Asegúrese de que no haya un cortocircuito o un circuito abierto.
- Asegúrese de que el lado de las almohadillas de alimentación esté hacia arriba.

Guía de montaje Hexacóptero DJI F550

El fabricante especifica los siguientes pasos para el montaje del multicóptero DJI F550:

- 1- Instale el tablero (placa) inferior. Tenga en cuenta que debe instalar los tornillos con la fuerza adecuada para evitar que se rompan las roscas. Use pegamento para tornillos adecuado para instalar los tornillos.
- 2- Instale su sistema de control de vuelo y sistema electrónico.
- 3- Instale ESC y motores. Asegúrese de que la dirección de rotación de cada motor sea la misma que se muestra en la figura. De lo contrario, cambie cualquiera de las dos conexiones de cables del motor incorrecto para cambiar su dirección de rotación.

- 4- Ordene todos los cables. Asegúrese de que todos los cables no sean cortados por los bordes del marco o las hélices. Alise los bordes del tablero (o marco) si es necesario
- 5- Instale el tablero (o marco) superior.
- 6- Instale las hélices después del procedimiento de configuración del sistema de control de vuelo. Asegúrese de que la dirección de rotación de las hélices sea la misma que muestra la figura. Apriete la hélice girándola en la dirección de bloqueo. No utilice ningún bloqueador de hilo.

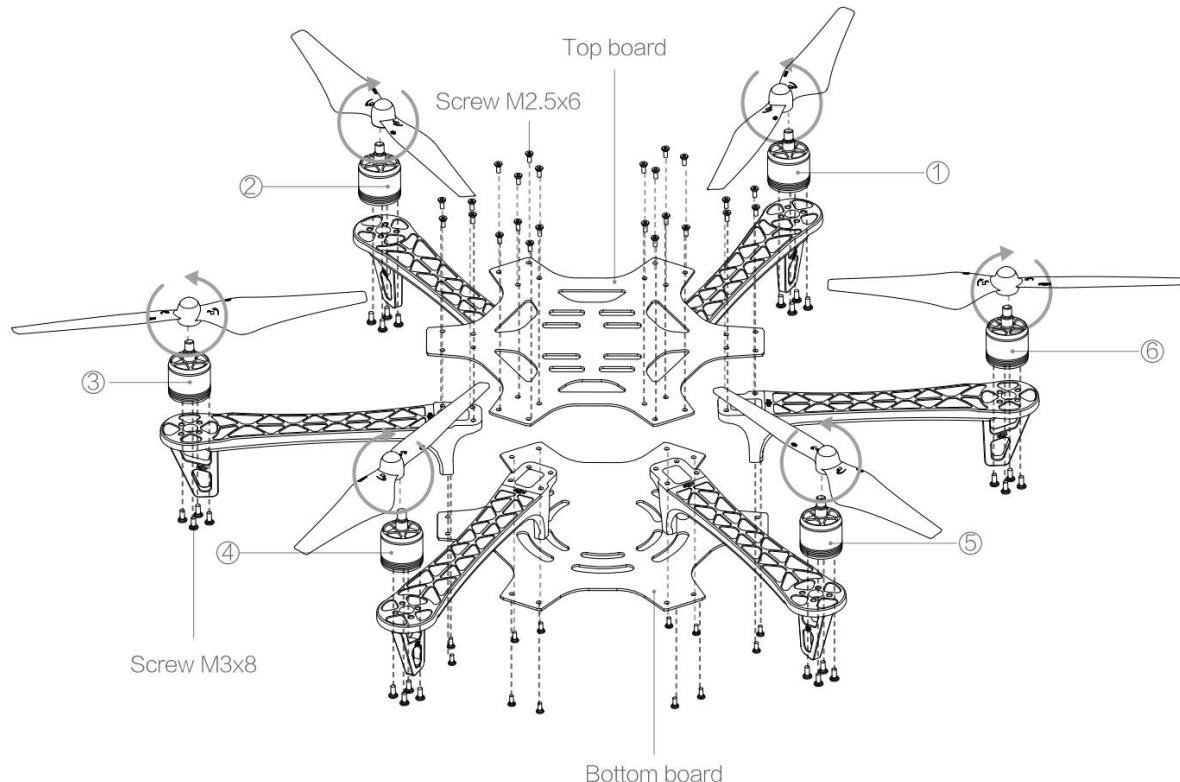


Figura 21 – Montaje estructura DJI F550

Para tener en cuenta:

- Tenga en cuenta que los brazos ①② apuntan a la nariz (o frente) del avión y los brazos ④⑤ apuntan a la cola del avión. Se recomienda elegir brazos del mismo color para la misma dirección. Vea desde arriba, los motores en los brazos ①③⑤ giran en sentido contrario a las agujas del reloj (CCW) y los motores en los brazos ②④⑥ giran en el sentido de las agujas del reloj (CW).

3.2.4 Descripción del montaje

La estructura del kit Flame Wheel 550 (DJI) ofrece compatibilidad con los motores DJI 2312E, ya que han sido ensayados previamente por el fabricante, no presenta problemas con las vibraciones y es levantada fácilmente por ellos. Además, nos permitirá alojar todo el sistema embarcado (autopiloto + hardware), y su geometría nos será compatible con piezas adicionales en el caso de que sea necesario.

La placa inferior contiene un circuito integrado, lo que permitirá ahorrar espacio, cableado y la instalación; por tanto, también ahorraremos peso, tiempo y medios.

La Figura 22, muestra a la izquierda los motores y ESC dispuestos en su caja, el cuerpo al centro y los brazos estructurales a la derecha. Como observamos, el cuerpo posee unos cuantos orificios que permitirán el paso de aire, lo que ayudará a la refrigeración.



Figura 22 – Kit DJI F550

Llegados a este punto, podemos iniciar el montaje.

Para empezar, medimos la distancia a la que queremos colocar los ESC respecto del cuerpo (nosotros los hemos colocado a la mitad del brazo de la estructura). Cortamos el cable de alimentación sobrante y lo pelamos, de forma que observamos dos filamentos en el interior: un cable rojo (positivo) y otro negro (negativo), estos son los cables de alimentación del ESC. Debemos soldar los cables de los ESC al circuito integrado, de forma que el cable negro se suelde en la pletina (o almohadilla) con el símbolo negativo, y el cable rojo en la del símbolo positivo. Hay que ir con cuidado de que los filamentos de los dos cables no se crucen y provoquen un cortocircuito.

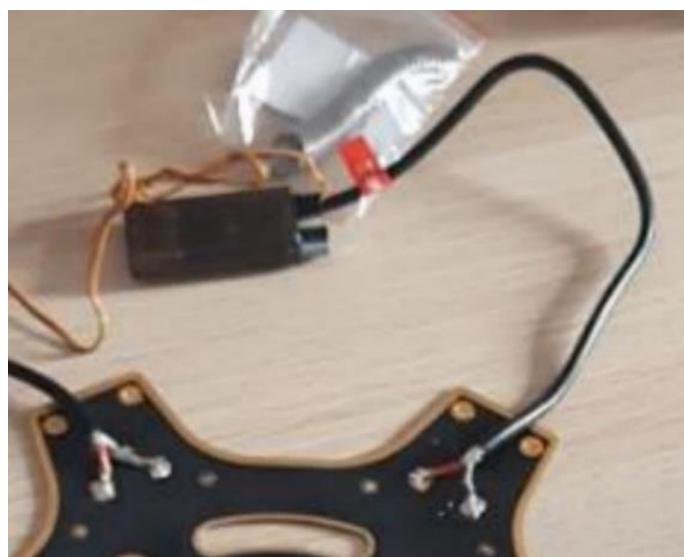


Figura 23 – Detalle del primer ESC soldado

También aprovechamos y hemos soldado el conector amarillo que dará corriente al circuito desde la batería LiPo, de la cual hablaremos más adelante. Para soldar el conector: el cable rojo al positivo y el negro al negativo. Para evitar cortocircuitos innecesarios, es recomendable colocar termocontraíble en el conector, y si se cree necesario, en los cables de los ESC.

A continuación, procedemos al montaje de los brazos de la estructura. Cabe resaltar que esta pieza en la que hemos soldado los cables será la parte inferior de la estructura o marco, por lo que atornillamos las patas de los brazos sobre la pieza; añadimos que, en nuestro caso, los brazos rojos se han colocado en la parte frontal (Frente o Nariz del hexacóptero) porque así lo recomienda el fabricante.

Acto seguido, colocamos los ESC de cada motor en la parte inferior de su brazo correspondiente; los hemos sujetado sobre cada brazo con un par de precintos. También, hemos atornillado los motores en los extremos de los brazos y respetando los sentidos de giro (CW o CWW) que vienen indicados en cada motor. Finalmente se han conectado los motores a través de 3 cables que van directamente a los 3 pines de salida de los ESC.



Figura 24 - Detalle de conexión y sujeción del conjunto Motor + ESC

Finalmente, atornillamos la parte superior del marco y colocamos el Módulo de Alimentación que recibirá energía de la batería y entregará la alimentación hacia el conector amarillo mencionado anteriormente para energizar los ESC y a su vez proporcionará una tensión regulada de 5 VDC para alimentar la Controladora de Vuelo. También se colocaron las hélices a fin de obtener una visualización preliminar del multicóptero.

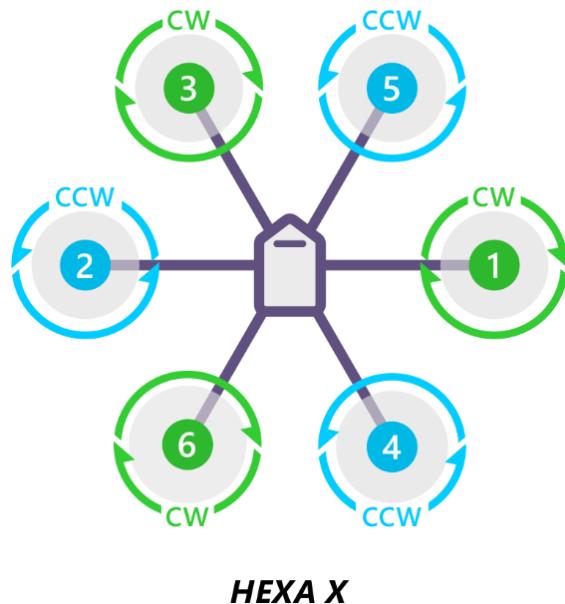
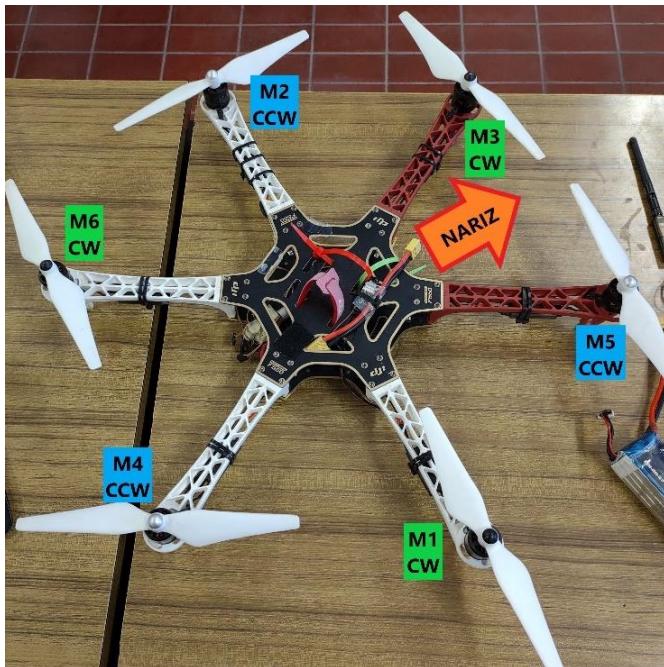


Figura 25 – Hexacóptero DJI F550, vista preliminar

Tal como se muestra en la Figura 25, se ha respetado el sentido de giro de los motores y, además, se han colocado las hélices en función del giro de los motores, es decir, las hélices con tuerca de color plata corresponden a los motores CCW (giro en sentido antihorario) y las hélices con tuerca de color negro corresponden a los motores CW (giro en sentido horario). Por otra parte, la numeración de los motores (del 1 al 6) representa el orden de conexión hacia la controladora de vuelo que se verá más adelante. Finalmente, como mencionamos anteriormente, el frente o nariz del dron se corresponde con el eje equidistante de los brazos de color rojo y cuyo sentido viene indicado por la flecha de color naranja; esto será de utilidad a la hora de ubicar la controladora de vuelo y la antena del Receptor GNSS dado que estos dos elementos también tienen un frente y deben estar alineados (en dirección y sentido) con la nariz de la estructura del dron.

3.3 Sistema Embarcado

Como se mencionó anteriormente, el sistema embarcado se encarga de todos los procesos de información, control y comunicación del dron. Este sistema contempla, además del autopiloto, los componentes de hardware externos tales como la antena GNSS, el módulo de telemetría, el receptor RC, etc. De ahora en adelante, hablaremos más precisamente del autopiloto o controladora de vuelo que, como veremos, incluye los sensores y administra las comunicaciones.

3.3.1 Autopiloto o controladora de vuelo

La controladora de vuelo (Flight Controller) es una placa generalmente basada en un microcontrolador (MCU) con firmware especialmente escrito para estabilizar y controlar el vuelo de la aeronave. Tiene sensores internos y externos de los que toma lecturas y luego usa esos datos para tratar de inferir la pose de la aeronave (posición y orientación). Luego, con la ayuda de un algoritmo de control muy sofisticado, intentará estabilizar la aeronave y hacer que mantenga su

pose actual, o dirigirla a una nueva pose deseada. Logrará estabilizar la aeronave comparando constantemente su pose actual (inferida de sus sensores) y la pose deseada (dónde quiere estar) y en función de esa información decidirá cuánto empuje debe aplicar a cada uno de sus rotores para corregir su pose. Los sensores que se encuentran con frecuencia en los controladores de vuelo típicos son: acelerómetro 3D, giroscopio 3D, altímetro (barómetro - sensor de presión barométrica), brújula digital (magnetómetro) y un receptor GPS. Aunque en la práctica, solo se necesita un acelerómetro 3D, un giroscopio 3D y GPS para mantener un multirrotor (o multicóptero) aerodinámicamente estable (es decir, flotando en el aire); sin embargo, los otros sensores mencionados son necesarios para hacer posible una funcionalidad más avanzada, como mantener una posición, orientación o velocidad dada, o navegar puntos GPS en una ruta predeterminada, etc.

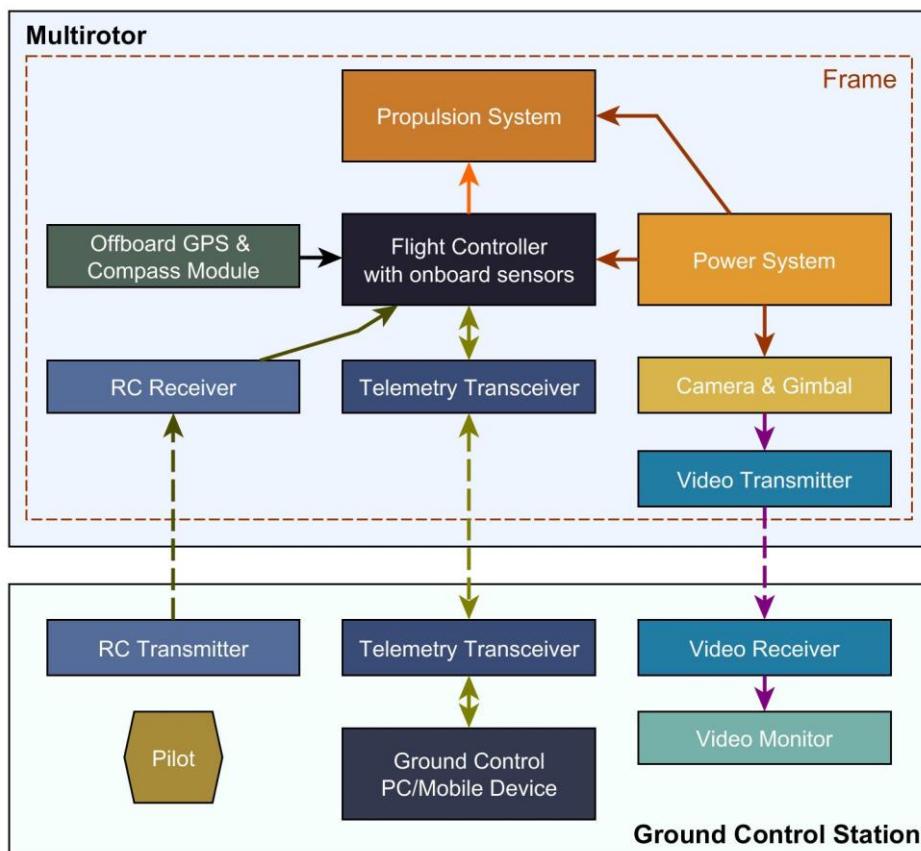


Figura 26 – Diagrama en bloques de un Multicóptero para fotografía aérea

Los multirrotores son inherentemente aerodinámicamente inestables y es muy difícil estabilizarlos controlando manualmente el empuje de sus rotores. Por esa razón, se requiere un controlador de vuelo electrónico para estabilizarlo, porque el controlador de vuelo puede ejecutar un bucle de control (es decir, leer los sensores, calcular errores y tomar las medidas de corrección necesarias) a alta frecuencia. Por el contrario, los drones de ala fija ("aviones") son inherentemente aerodinámicamente estables y se pueden volar controlando manualmente el empuje de sus motores y las superficies de control. Por lo tanto, los controladores de vuelo son opcionales para estabilizar los drones de ala fija, aunque aún son necesarios para la navegación con GPS. El software embebido de un controlador de vuelo no es para nada trivial. Generalmente contiene algoritmos

sofisticados de uso frecuente en pilotos automáticos, como bucles de control PID anidados para controlar la orientación y velocidad en 3D y filtros Kalman para fusión de sensores, entre otras cosas. Sin embargo, el firmware, que es un binario pre-compilado del software del piloto automático, generalmente está disponible directamente para cargarlo en la placa del controlador de vuelo.

3.3.2 Sistema embarcado (Autopiloto)

Navio2 es un autopiloto HAT para Raspberry Pi con tecnología Ardupilot y ROS. Para su funcionamiento, el fabricante pone a disposición una Imagen OS preconfigurada que consiste en un sistema operativo Raspbian con Ardupilot y ROS (Robot Operative System) preinstalados y listos para ejecutarse con un par de comandos simples. ArduPilot es el software de piloto automático de código abierto más avanzado y completo. Con Navio2, su código se ejecuta directamente en la Raspberry Pi con kernel Linux.

Procesador de vuelo: *Raspberry Pi 3 Model B+*

En el mercado existen diversos procesadores de vuelo, a continuación, podemos observar gráficamente algunos procesadores de vuelo y ciertos criterios por los cuales es recomendable utilizar una Raspberry Pi.

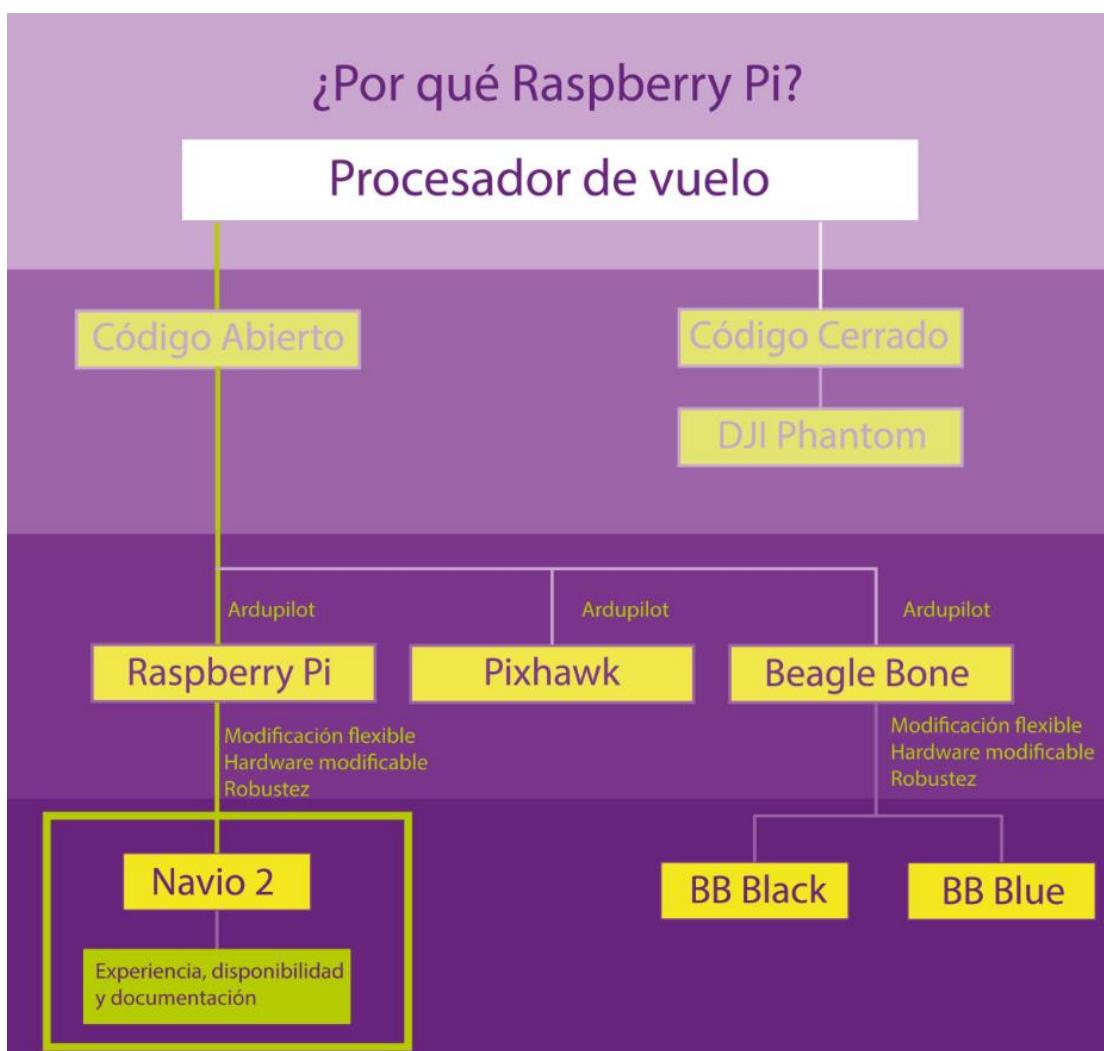


Figura 27 – Selección del Procesador de Vuelo

El procesador de DJI Phantom no ofrece código abierto. Pixhawk ofrece un sistema de control de vuelo (procesador y hardware del autopiloto ya integrados) bastante potente, pero no ofrece la flexibilidad de configuración y modificación que ofrece Raspberry o BeagleBone, lo que limitaría mucho las posibilidades de ampliar las capacidades del multicóptero.

Las de BeagleBone, por su parte, son de código abierto y hacen uso de ArduPilot, pero no posee mucha documentación.

En este trabajo se tiene a disposición la **Raspberry Pi 3 Model B+**, que resulta un procesador económico, bastante pequeño, y compatible con software libre y numerosos periféricos. Esta funciona con HDMI, tiene numerosos puertos USB, conexión WiFi, robustez y compatibilidad con hardware de autopilotos. Esta permite hacer uso de NAVIO2, además de contar con documentación de apoyo en la web.

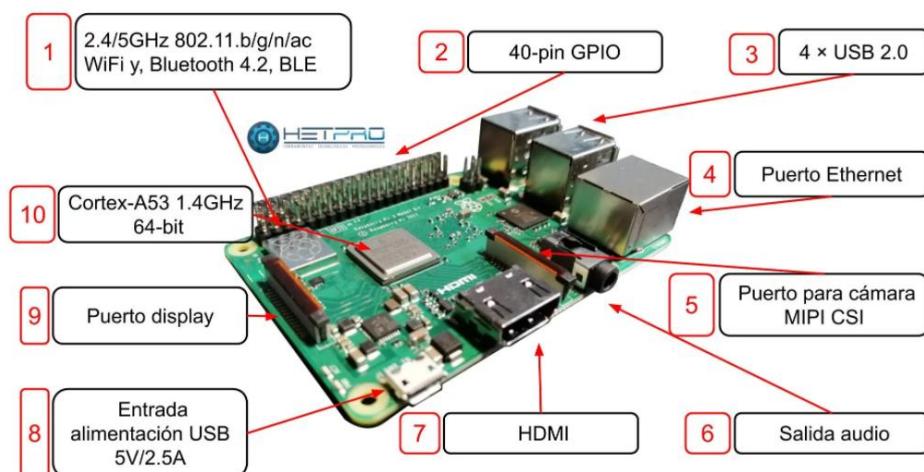


Figura 28 – Raspberry Pi 3 model B+

Es posible que la carga de trabajo de cálculo sobrecaliente el núcleo del procesador. Por ello, es recomendable hacer uso de disipadores de calor específicos para transmitir la temperatura a estos cuerpos, y que éstos radien el calor al exterior.



Figura 29 – Raspberry Pi con los disipadores colocados

Hardware del autopiloto: NAVIO2

En el hardware del autopiloto reside la clave de la “transformación” del procesador de vuelo en una controladora de vuelo funcional. Debe poseer la arquitectura capaz de tomar y procesar datos fundamentales para la navegación, poder ejecutar un autopiloto, ofrecer una gestión eficiente de la energía de alimentación y ser compatible con el procesador de vuelo (Raspberry Pi).

En nuestro caso, tenemos a disposición el hardware del autopiloto NAVIO2 que es una tecnología de funcionamiento específico para Raspberry Pi, posee una IMU dual (acelerómetros, giróscopos y magnetómetros), un preciso barómetro, un receptor de GNSS (localización mediante GPS, Galileo, GLONASS, Beidou y satélites SBAS) acompañado de su antena externa MCX, un coprocesador RC I/O, posibilidad de añadir sensores adicionales y radio, suministro de energía de triple redundancia con protección frente a sobretensiones y un módulo de alimentación. Además de todas estas características, tenemos en cuenta una muy importante: cuenta con la capacidad de hacer uso de ArduPilot, el autopiloto de código abierto que hemos mencionado anteriormente.

La página oficial de NAVIO2 nos facilita la documentación necesaria para la configuración básica de un procesador de vuelo Raspberry Pi con el hardware del autopiloto NAVIO2 y el sistema operativo ROS (Robot Operative System).

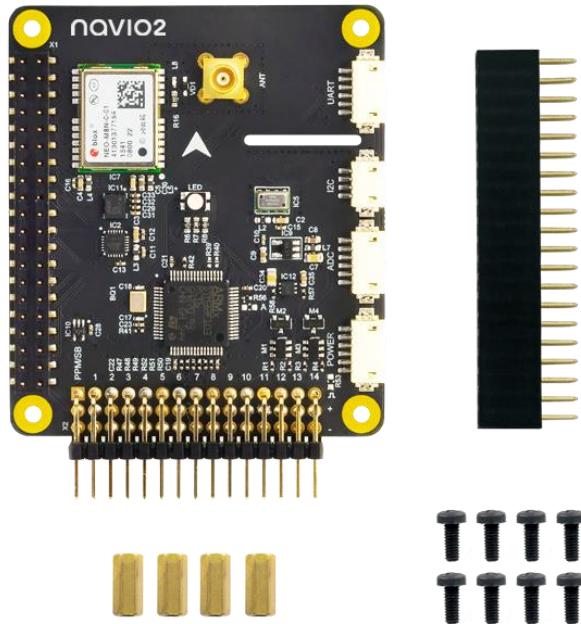


Figura 30 – Navio2, conector para RPi, 4x espaciadores y 8x tornillos M2.5

NAVIO2 se presenta a nivel físico como un módulo o pequeña placa que se coloca sobre la Raspberry Pi mediante unos conectores que vienen de fábrica en ambos. Estos dos componentes han de atornillarse para asegurar la fijación mediante unas piezas de color dorado y sus propios tornillos que acompañan la NAVIO2 en su caja.

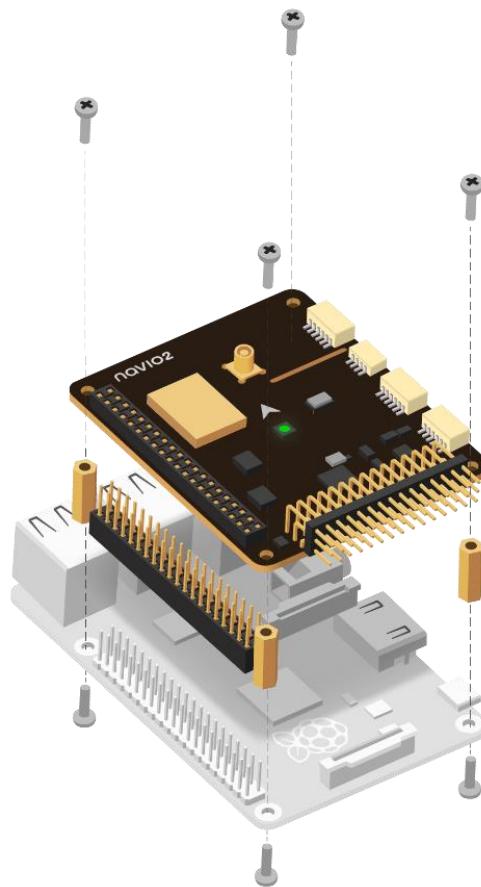


Figura 31 – Montaje Navio2 y Raspberry Pi

NOTA: Debemos tener en cuenta de que la placa Navio2 tiene una flecha que apunta hacia la nariz o frente de la aeronave. Por lo tanto, al momento del montaje, la controladora de vuelo Navio2 + RPi debe alinearse con la nariz del hexacóptero DJI F550 en la misma dirección y sentido.

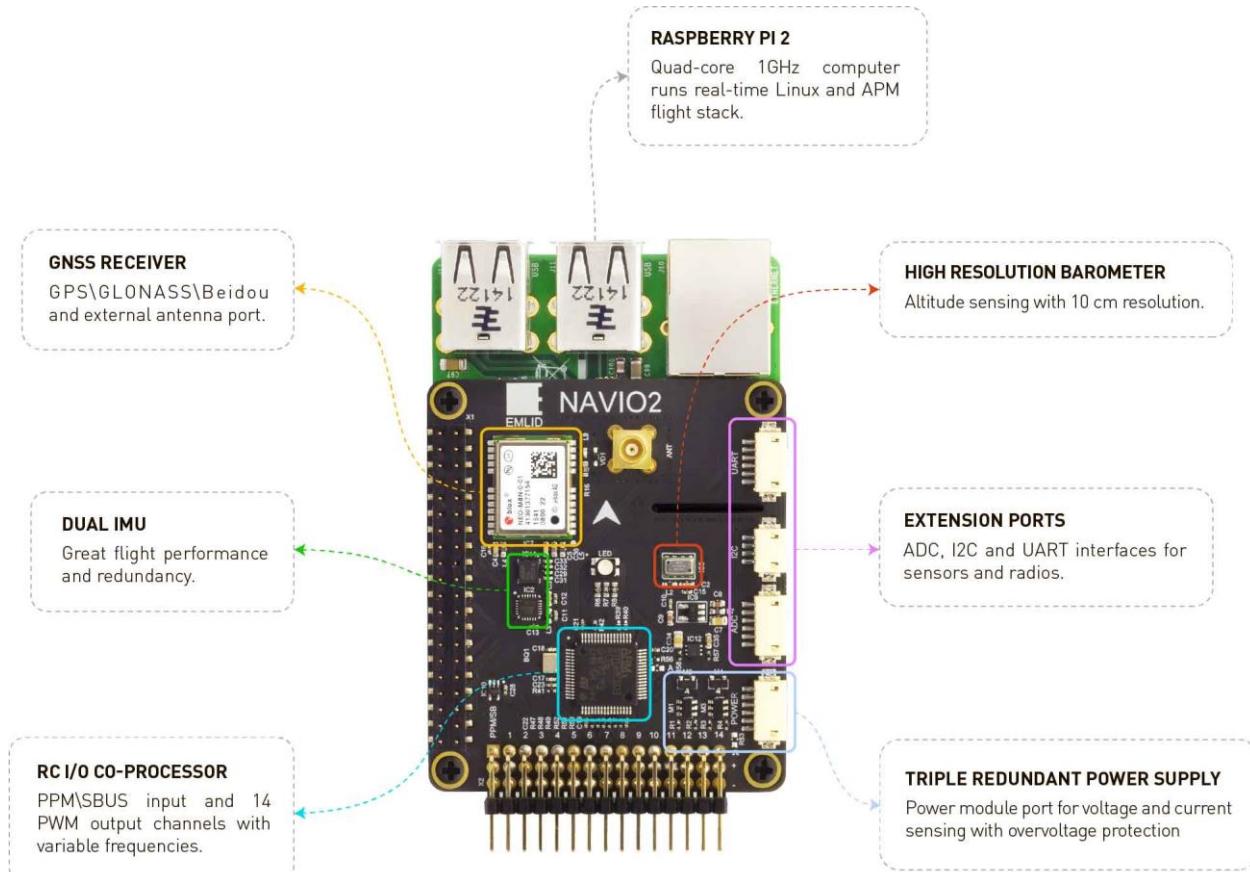


Figura 32 – Navio2 montado sobre Raspberry Pi

3.3.3 Montaje

Para colocar el procesador y el hardware del autopiloto en el hexacóptero DJI F550 hay múltiples opciones, pero nosotros hemos utilizado una estructura fabricada mediante una impresora3D que protege a los procesadores de los golpes inferiores; a esto le hemos añadido la cinta adhesiva de espuma de doble cara (Cinta 3M), asegurando así la fijación al marco inferior del multicóptero a fin de contribuir a la reducción de las vibraciones que pueden causar un mal funcionamiento del dron. De ahora en adelante, todos los componentes que vayan a ser montados sobre la estructura del hexacóptero DJI F550 deben ubicarse de forma tal que el peso quede uniformemente distribuido, entonces, siguiendo este criterio, para la controladora de vuelo y la batería, por ejemplo, es recomendable colocarlas en la parte central de la estructura a fin de no generar contrapesos en un lateral del dron más que en el otro.

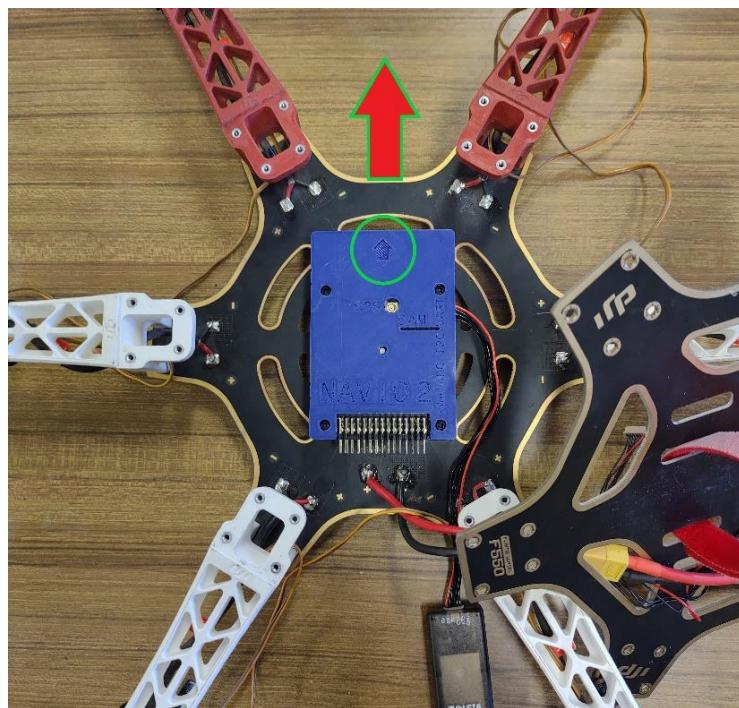


Figura 33 – Montaje de la Controladora de vuelo al Hexacóptero DJI F550

De la Figura 33 se ve que hemos alineado la controladora de vuelo con la nariz del multicóptero en dirección y sentido. Esto es importante porque va a definir el comportamiento del dron y permitirá realizar las maniobras de este sin dificultad.

3.3.4 Conexión ESC y motores

Anteriormente, se explicó cómo se realiza el montaje del Hexacóptero DJI F550, pero no se habló del conexionado de los pares ESC-Motor con la controladora de vuelo. Ahora que tenemos más detalles del procesador de vuelo y del hardware del autopiloto, procedemos a indicar el conexionado correcto entre la controladora de vuelo y el sistema de propulsión, es decir los pares ESC-Motor.

El motor DJI 2312E es un motor trifásico Brushless (sin escobillas), esto quiere decir que su estructura interna simplificada corresponde a la de la Figura 34, en donde hay tres cables con el mismo voltaje, cada uno conectado a una bobina separadas entre si 120° .

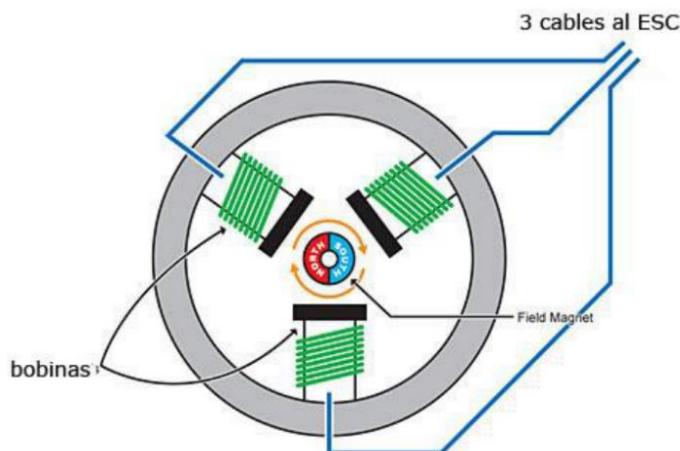


Figura 34 – Esquema de un motor brushless

Los 3 cables del motor van conectados al variador (ESC) que tiene la función de activar cada una de las bobinas en orden, creando un campo magnético que produce el giro del motor.

Teniendo esto en cuenta, es relativamente sencillo cambiar el sentido del giro, bastaría con cambiar el orden de conexión de los dos cables exteriores dejando el central inmóvil, la razón es que el cable central siempre se activará en segundo lugar y no tiene sentido cambiarlo para cambiar el sentido del giro.



Figura 35 – Cambio de giro de los motores

Orden de conexión de los ESCs y Navio2

Tal como se explicó en la vista preliminar del Hexacóptero DJI F550 de la Figura 25, es necesario respetar el orden de conexión de los motores con la controladora de vuelo. Anteriormente, se explicó la conexión de los ESC con los motores y también, como conectar los ESC con la fuente de alimentación (Batería). Sin embargo, nos quedó pendiente la conexión del cable que recibirá la señal de la controladora de vuelo y la enviará hacia cada uno de los ESC. Se trata de unos cables de dos hilos, uno marrón (GND) y otro naranja (SEÑAL), que normalmente vienen con un conector GPIO hembra y van conectados a los puertos de salida PWM del Navio2 numerados del 1 al 14.

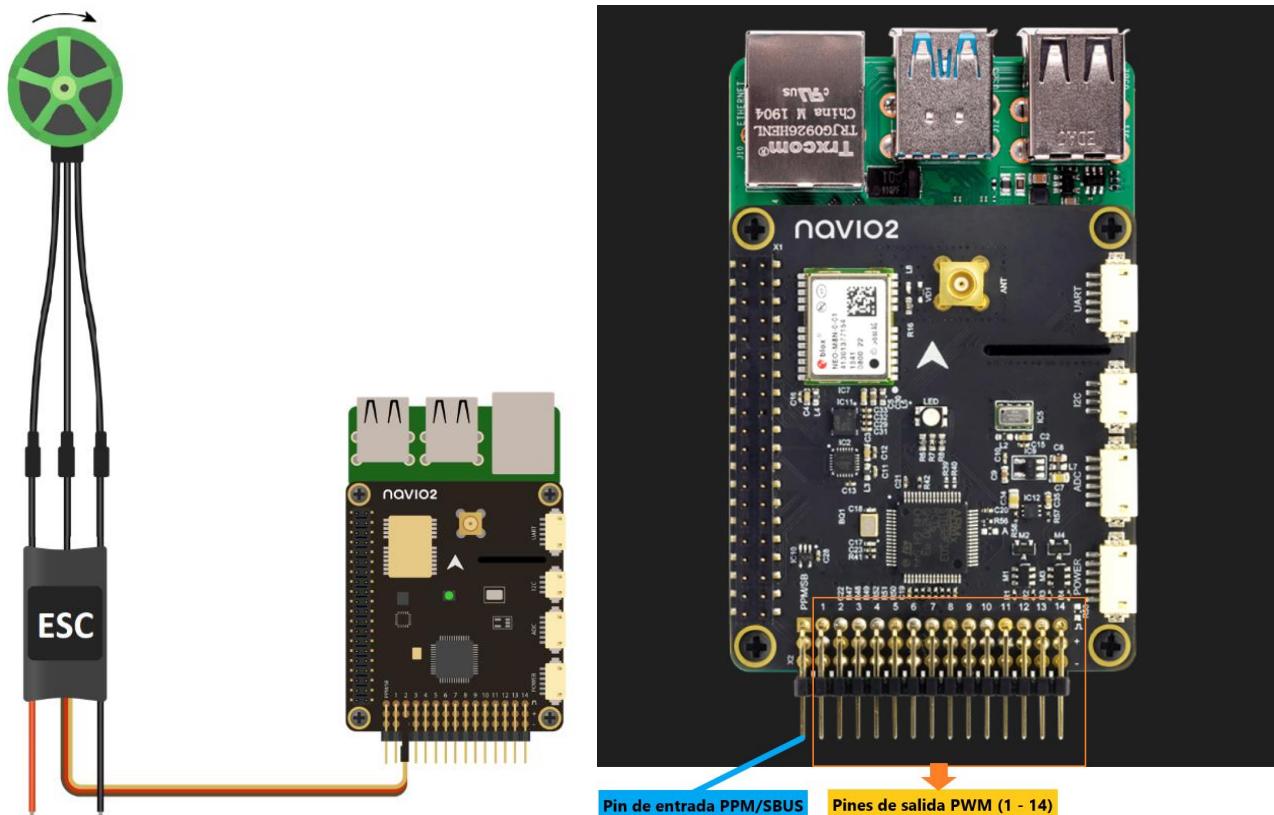


Figura 36 – Conexión ESC y Navio2

NOTA: En la Figura 36, vemos que el ESC recibe la señal del Navio2 mediante 3 cables (GND, VCC y SEÑAL). Sin embargo, los DJI 420 Lite que utilizamos, sólo requieren 2 cables, uno marrón para GND y otro naranja para la SEÑAL.

En cuanto al conexionado de los 6 pares ESC-Motor de nuestro Hexacóptero DJI F550, debemos conectar los cables de GND y SEÑAL de cada ESC a los pines de salida PWM del Navio2 por número de motor. Es decir, el ESC del Motor 1 va conectado al pin de salida PWM1, el ESC del Motor 2 va con el PWM2 y así sucesivamente para los 6 motores. El orden o numeración de los motores viene definido según el tipo de marco (frame) de vuelo que configuremos.

Para nuestro Hexacóptero, vamos a utilizar el tipo de marco “HEXA X” que se muestra en la Figura 37 donde los números indican qué pin de salida PWM del Navio2 se debe conectar a cada motor/hélice. La dirección de giro de la hélice se muestra en verde (giro en sentido horario, CW) o azul (giro en sentido anti-horario, CCW).

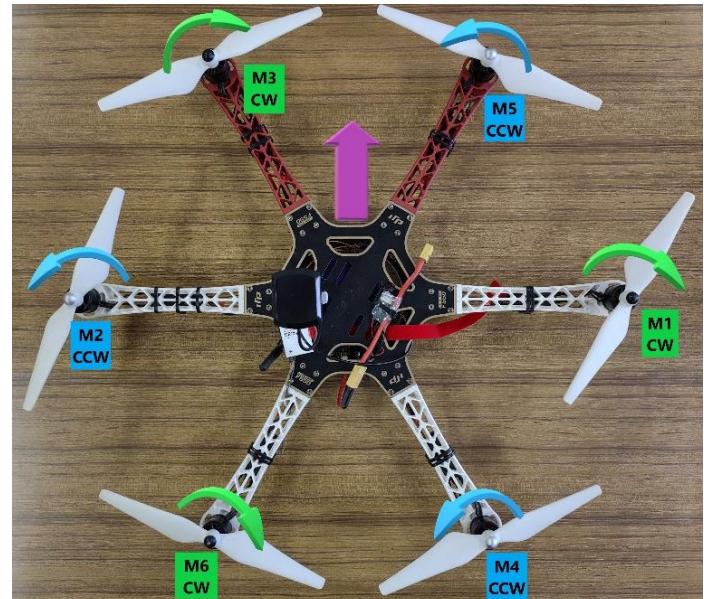
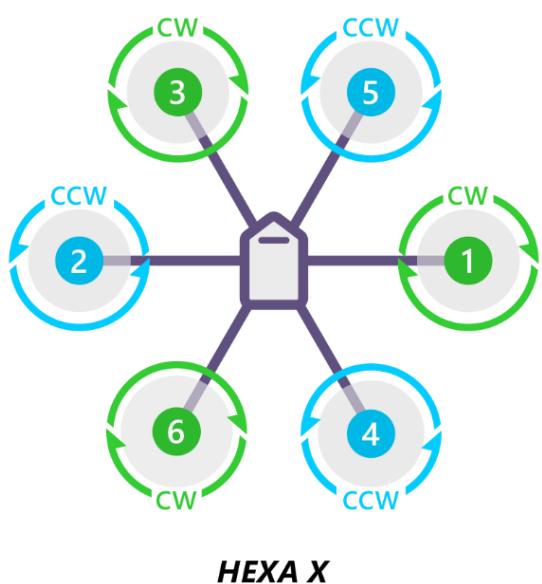


Figura 37 – Configuración Motores HEXA X

Los diagramas anteriores muestran dos tipos de hélices: en el sentido de las agujas del reloj (CW, llamadas pulsadoras) y en sentido contrario a las agujas del reloj (CCW, llamadas tiradoras). El método más confiable para reconocer el tipo de hélice correcto es analizar su forma, como se muestra a continuación. El borde más grueso es el borde de ataque que se mueve en la dirección de rotación. El borde posterior es generalmente más delgado.

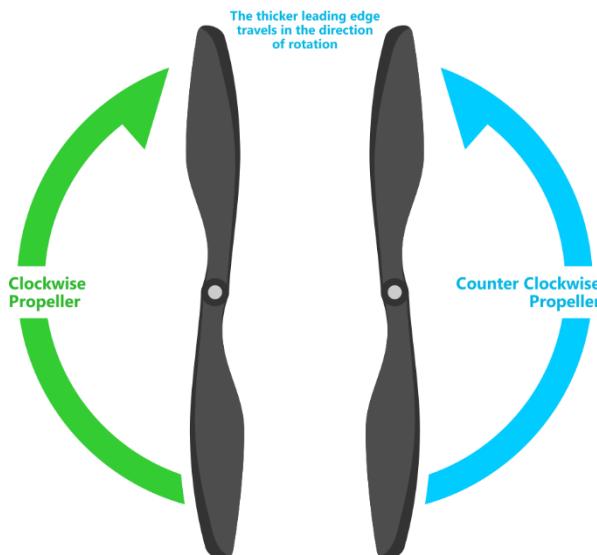


Figura 38 – Reconocimiento de las Hélices CW y CCW

3.4 Módulos de Telemetría

La telemetría es un proceso de comunicación con el cual se efectúan las mediciones y recogidas de datos en puntos remotos o inaccesibles, y se transmiten a equipos receptores para su monitorización.

Los drones generalmente incluyen una frecuencia de enlace de radio que se usa para las comunicaciones con la Estación de Control en Tierra.

Los módulos de telemetría como su nombre lo indica, nos ayudan a recibir los datos inalámbricos de telemetría desde el dron en una computadora personal o dispositivo móvil. También nos permite cambiar remotamente algunos parámetros de configuración en el controlador de vuelo y realizar funciones avanzadas, como enviar y activar misiones de navegación autónoma de puntos GPS. Los módulos de telemetría están disponibles para trabajar en las frecuencias de 433 MHz y 915 MHz. Se debe elegir la frecuencia legalmente permitida nuestro país, de conformidad con las normativas locales. A continuación, se muestra los estándares aplicables a la región de Argentina.

Región	Normas Pertinentes	Modelo
Argentina	Comisión Nacional de Comunicaciones <i>Ver RR UIT-R2 (EDICIÓN 2019)</i> ENACOM	SikRadio 900MHz MIN_FREQ: 902000 KHz MAX_FREQ: 928000 KHz Norma: Comisión Nacional de Comunicaciones

Figura 39 – Estándar Radio Telemetría aplicable a Argentina sin ninguna licencia

3.4.1 Radio de Telemetría SiK

Una radio de telemetría SiK es una de las formas más fáciles de configurar una conexión de telemetría entre el piloto automático y una estación terrestre. Es una plataforma de radio de código abierto pequeña, ligera y económica que generalmente permite rangos de más de 300 [m] "listos para usar". La radio utiliza firmware de código abierto que ha sido especialmente diseñado para funcionar bien con paquetes MAVLink y para integrarse con Mission Planner, Copter, Rover y Plane.



Figura 40 – Sistema de Radio Telemetría SiK

Puertos de conexión Radio Telemetría SiK

La radio tiene módulos de aire y tierra intercambiables, lo que significa que los usa como un par, pero no importa cuál vaya en el vehículo y cuál permanezca en el suelo o estación terrestre (PC).

- El “módulo tierra” tiene un conector USB que facilita la conexión directa a su estación terrestre (PC o Tablet Android). En una máquina con Windows 7 o superior, los controladores necesarios se instalan automáticamente la primera vez que conecte el módulo de tierra, pero si no se instala por alguna razón, debe realizar la instalación manual de los controladores del módulo de telemetría específico cuando lo tenga conectado a su PC.
- El “módulo aeronave” tiene un conector FTDI de 6 pines, lo que le permite conectarse directamente al puerto de telemetría del piloto automático.

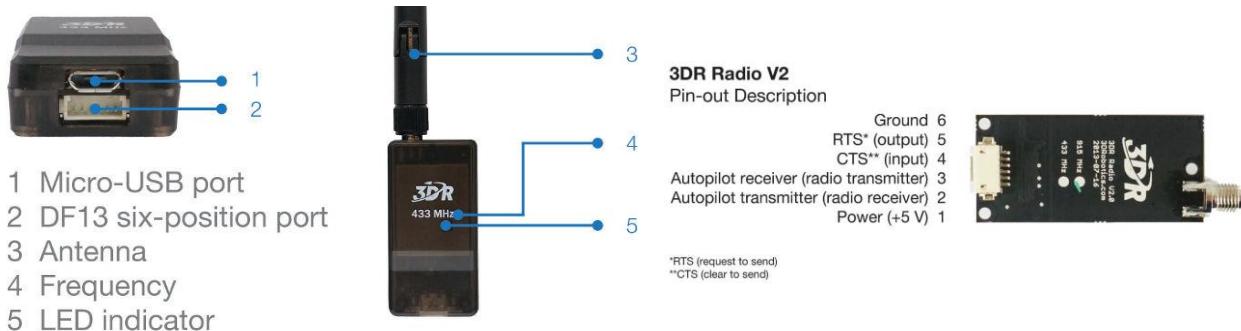


Figura 41 – Puertos de conexión del Sistema de Radio Telemetría SiK

3.4.2 Radio Telemetría HT0X – 915 MHz

En este proyecto se disponen de 2 Módulos de Telemetría HT0X de 915 MHz del fabricante SHENZHEN HELIXIONGDI TECHNOLOGY CO.,LTD (Trademark: HolyBro). Estos cumplen con la reglamentación que especifica la Comisión Nacional de Comunicaciones de Argentina. A continuación, se muestran los módulos de telemetría de 915 MHz que se utilizaron en nuestro trabajo.



ESPECIFICACIONES:

- A). Operation Frequency: 916.215MHz~927.215MHz
- B). Modulation: GFSK
- B). Chanel spacing: 1MHz
- C). Number of Channel: 12
- E). Antenna Type: Dipole antenna
- F). Antenna Gain: 2.0dBi(Dipole antenna)
- G). Power Supply: DC 5V from USB port

Figura 42 – Módulo de Telemetría 915 MHz utilizado en el proyecto

Rango esperado

El alcance típico logrado con las radios utilizando la configuración estándar y la antena es de alrededor de 500 m, pero el alcance varía mucho dependiendo de las fuentes de ruido y la configuración de la antena.

LED de estado

Los radios tienen 2 LED de estado, uno Rojo y otro Verde. El significado de los diferentes LED es:

- ✓ LED Verde parpadeante: buscando otra radio.
- ✓ LED Verde sólido: se estableció un enlace con otra radio.
- ✓ LED Rojo parpadeante: transmisión de datos.
- ✓ LED Rojo sólido: modo de actualización de software.



Blinking green
Searching for paired radio



Solid green
Link established with paired radio



Blinking red
Transmitting data



Solid red
Firmware update mode

Figura 43 – LED de Estado del Módulo de Telemetría

3.4.3 Conexión de las Radios de Telemetría

- Conexión Navio2:** Los módems de radio se pueden conectar a través de la interfaz serial UART del Navio2 o a través de USB. En nuestro caso, utilizaremos el cable con el conector DF13 de 6 pines del módulo de telemetría para conectarlo al puerto UART del Navio2 tal como se muestra a continuación.

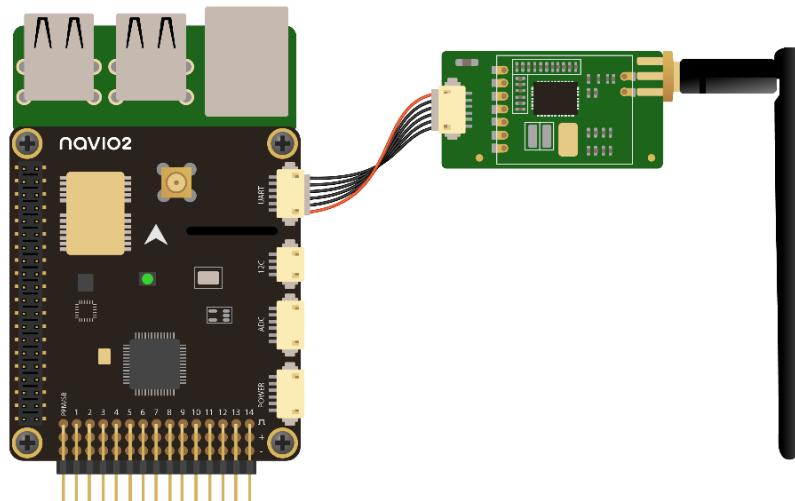


Figura 44 – Conexión Módulo de Telemetría al Navio2

- Conexión PC:** Para conectar el módem de radio a una PC con Windows basta con conectar el cable USB (incluido con el módulo de telemetría) a uno de los puertos USB de la PC. Los controladores necesarios se instalan automáticamente y la radio aparecerá como un nuevo "Puerto serie USB" en el Administrador de dispositivos de Windows en Puertos (COM y LPT).

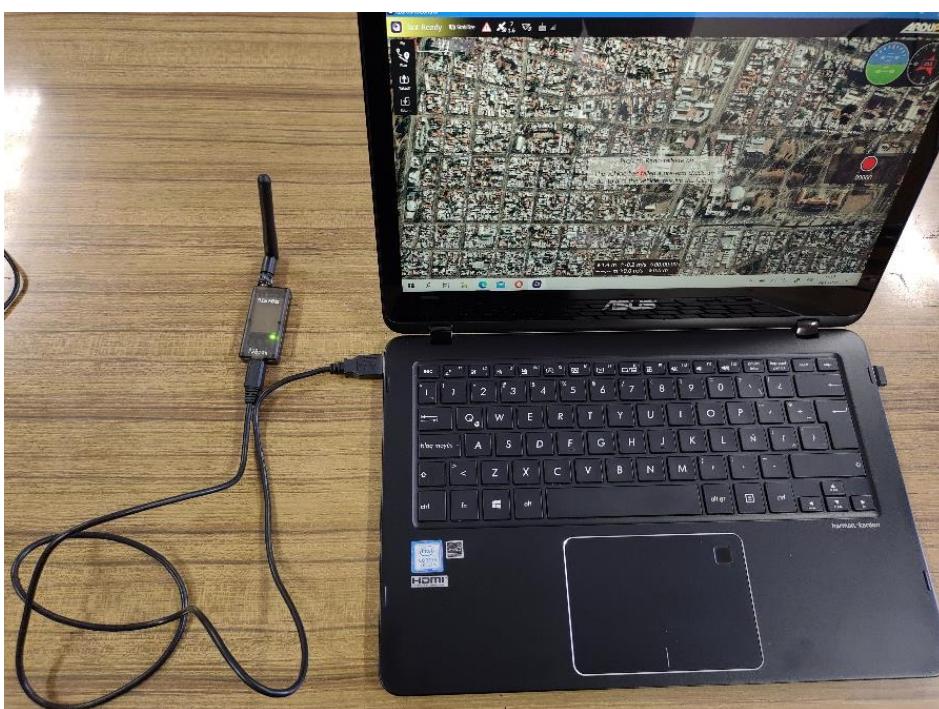


Figura 45 – Conexión Módulo de Telemetría a la PC

- Conexión Tablet Android:** Para conectar la radio a una tableta Android se utiliza el cable USB que viene incluido con la radio. A continuación, se deben seguir las instrucciones de la aplicación Ground Station que instalemos.



Figura 46 – Conexión Módulo de Telemetría a una Tablet Android

3.4.4 Montaje

El Módulo de Telemetría de la aeronave, que va a bordo del dron, se ubicó de forma tal de repartir el peso por igual en la estructura y que la antena esté libre de contacto con respecto a los otros componentes. En función de ello, la radio de telemetría se ubicó encima del marco inferior de la estructura del hexacóptero DJI F550 junto a la controladora de vuelo debido a la corta distancia del cable de conexión. Para fijar la radio a la estructura se utilizó la cinta adhesiva de espuma de doble cara (Cinta 3M), tal como recomienda el fabricante del hexacóptero.

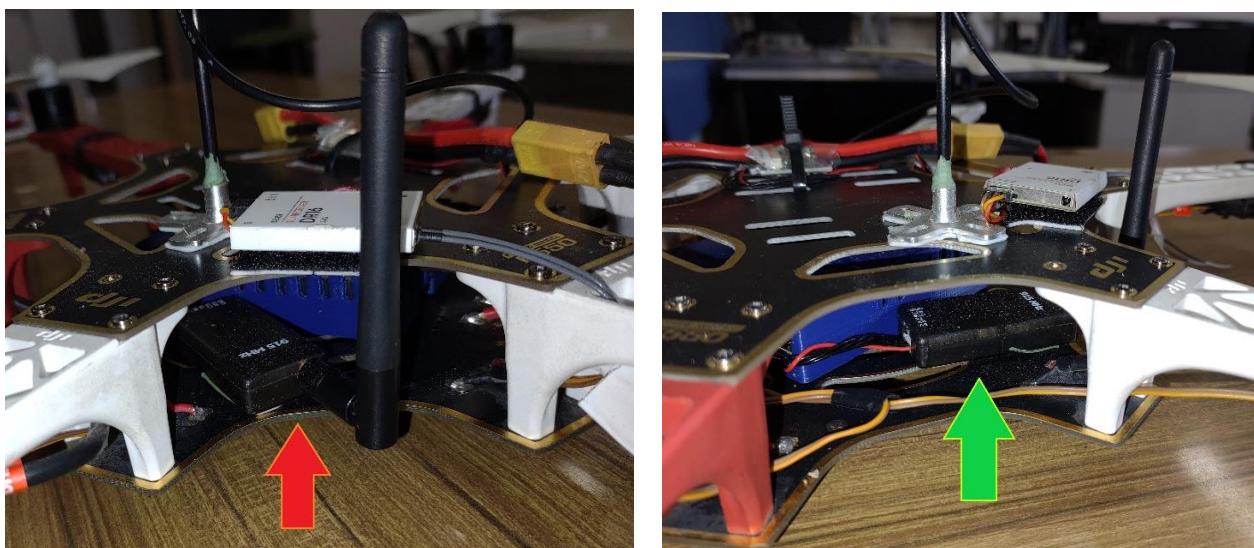


Figura 47 – Montaje del Módulo de Telemetría al Hexacóptero DJI F550

3.5 Sistema Radio Control (RC)

Cuando lo que deseamos es enviar órdenes, modificar la trayectoria o controlar cualquier aspecto del dron, no podemos depender de un cable para ello. Es necesario poseer una forma de modificar las órdenes que recibe el autopiloto a través de algún medio; para ello se utiliza un sistema de Radio Control (RC).

El sistema RC comprende de un par transmisor y receptor que trabajan a una frecuencia de 2.4 GHz (la frecuencia de trabajo más popular para los RC). Se requiere un sistema con al menos 4 canales de control para el vuelo básico de un multirrotor o multicóptero y un mínimo de 6 canales para incluir algunas funciones avanzadas, como ser múltiples modos de vuelo y algunas funciones de vuelo basadas en GPS. Si el presupuesto lo permite, se recomiendan 9 o 10 canales de control para una máxima versatilidad.

3.5.1 Sistema RC DT7&DR16 2.4 GHz

En nuestro caso disponemos del Sistema RC DT7&DR16 del fabricante DJI. Este sistema consta de un *Control Remoto DT7*, un *Receptor DR16*, el *cable de 3 pines* para conectar el receptor con la controladora de vuelo y un cable *Trainer port* para conectar dos mandos en modo maestro-esclavo.



Figura 48 – Sistema RC DT7&DR16 2.4 GHz

El Control Remoto DT7 es un dispositivo de comunicación inalámbrica de 7 canales que utiliza la banda de frecuencia de 2,4 GHz y usa codificación PPM (Modulación por Posición de Pulso) para la transmisión de los datos. Solo es compatible con el receptor DR16. Puede funcionar continuamente durante aproximadamente 12 horas y su distancia de comunicación es de hasta 1000 metros en un área abierta.

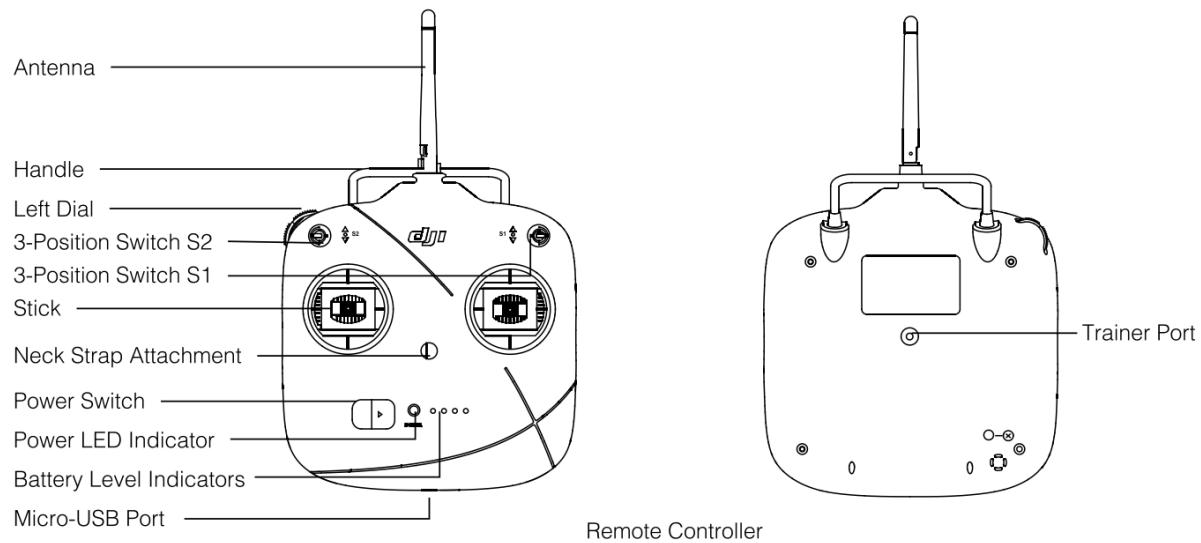


Figura 49 – Descripción Control Remoto DJI DT7

El DR16 es un Receptor de 16 canales que utiliza la banda de frecuencia de 2,4 GHz. Es compatible con el mando a distancia DT7.

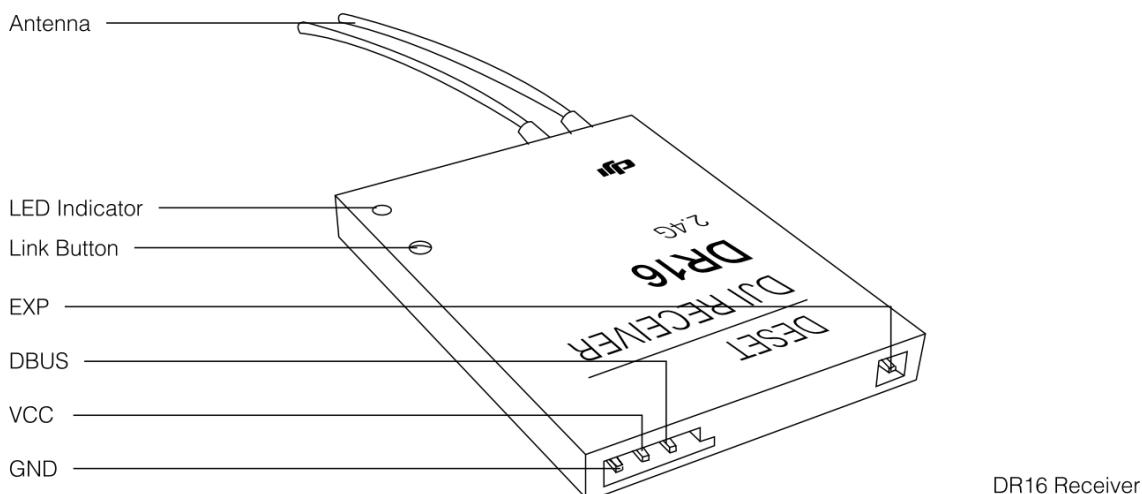


Figura 50 – Descripción Receptor DJI DR16

3.5.2 Conexión del Receptor DR16 al sistema de control de vuelo

El receptor DR16 está diseñado para usarse con los siguientes sistemas de control de vuelo: NAZA-M Lite, NAZA-M, NAZA-M V2, WooKong-M, A2. En nuestro caso estamos utilizando la controladora de vuelo Navio2 + RPi. Para ser utilizado en aplicaciones de piloto automático, Navio2 necesita decodificar la entrada RC. Navio2 admite la entrada S.Bus y PPM, que combina información sobre todos los canales PWM del receptor en una secuencia, que podría transferirse a través de un solo cable. Los valores de canal enviados por el control remoto se decodificarán y luego se utilizarán para el servocontrol.

Entonces, se debe conectar la salida del Receptor RC DR16 al pin de entrada PPM/S.Bus en Navio2. Para ello usamos el cable con conector de 3 pines y realizamos la conexión respetando los

pines de tierra (GND), alimentación (VCC) y señal (DBUS). Debemos tener en cuenta que Navio2 debe apagarse antes de conectar el receptor.

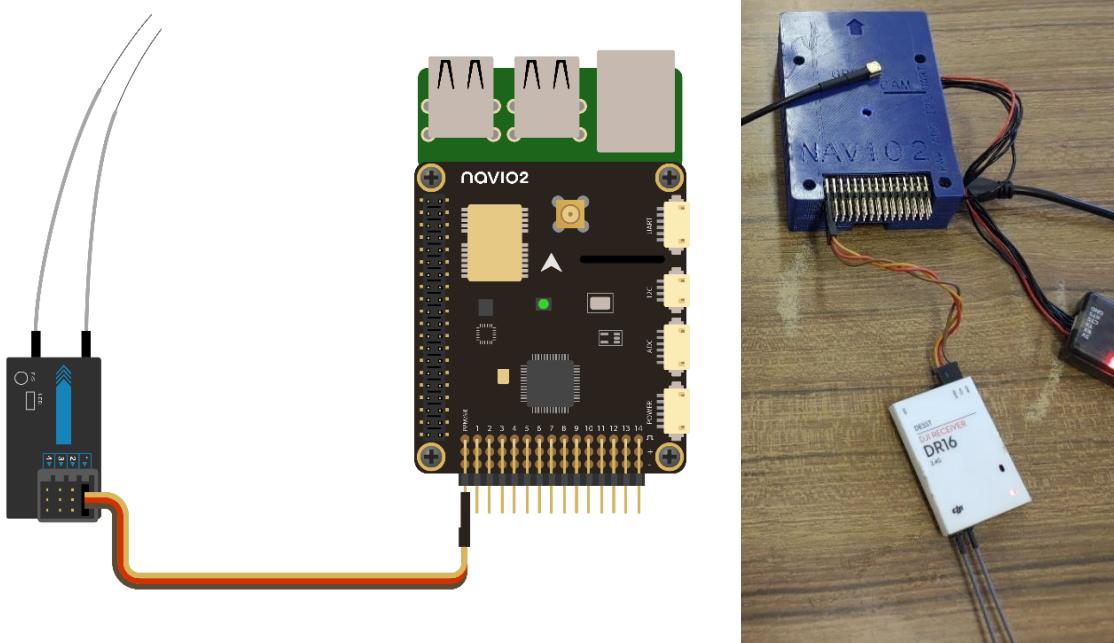


Figura 51 - Conexión del Receptor DR16 al sistema de control de vuelo

NOTA: Tomamos como referencia que el cable Marrón es GND, el Rojo es VCC y el Naranja es Señal (DBUS).

Vinculación de DT7 y DR16

Procedimiento de vinculación:

- 1) Encendemos el sistema de control de vuelo y el receptor DR16 (al estar conectado al autopiloto, se enciende automáticamente).
- 2) Encendemos el control remoto y lo colocamos a una distancia de 0,5 m - 1 m del receptor.
- 3) Presionamos el botón de enlace del receptor (situado junto al indicador LED) con un objeto delgado y lo mantenemos presionado. Una vez que el indicador LED del receptor parpadee en rojo, lo soltamos.
- 4) Cuando el indicador LED se vuelve verde fijo, el enlace entre el control remoto DT7 y el receptor DR16 se ha establecido con éxito.

3.5.3 Montaje Receptor DR16

De la misma forma que hicimos con el módulo de telemetría, el Receptor DR16 se colocó en el Hexacóptero DJI F550 de forma tal de no interferir con la posición de otros elementos y considerando la distancia del cable de conexión. En este caso, colocamos el DR16 encima del marco superior del Hexacóptero con la antena apuntando hacia la cola del dron, es decir opuesto al frente o nariz tal como se hace habitualmente. Para fijar el receptor RC al marco del dron, utilizamos un velcro adhesivo que nos permitirá remover fácilmente del DR16 o girarlo en la posición más conveniente. Luego, colocamos la antena entre uno de los orificios de un brazo del dron apuntado hacia abajo a fin de que las hélices no entren en contacto con la antena del DR16.



Figura 52 - Montaje del Receptor DR16 al Hexacóptero DJI F550

3.6 Antena del Receptor GNSS

Como mencionamos anteriormente, Navio2 cuenta con un barómetro de alta resolución (MS5611), dos unidades inerciales IMU (MPU9250 y LSM9DS1) que combinan un giroscopio 3D, un acelerómetro 3D y un magnetómetro 3D en el mismo chip y, además, cuenta un módulo receptor GNSS (Ublox NEO-M8N).

GNSS (Global Navigation Satellite System) es un sistema de satélites basado en el espacio que proporciona información de ubicación (longitud, latitud, altitud) e información de tiempo en todas las condiciones meteorológicas, en cualquier lugar de la Tierra o cerca de ella a dispositivos llamados receptores GNSS. El GPS es el sistema GNSS más utilizado del mundo fabricado por Estados Unidos. Navio2 cuenta con el Receptor GNSS *Ublox NEO-M8N* que rastrea satélites GPS, GLONASS, Beidu y Galileo; además cuenta con un conector MCX para conectar una antena externa activa o pasiva. Las antenas GNSS activas cuentan con magnetómetro y un LNA (Amplificador de Bajo Ruido) incorporado que permite amplificar señales de muy baja intensidad.

Las antenas GNSS permiten que las aplicaciones de rastreo y localización de ubicación accedan a las constelaciones de satélites GNSS. Captan las señales de banda L transmitidas desde el espacio y las transfieren a una unidad de procesamiento para determinar la ubicación de los receptores. En nuestro disponemos de la antena GNSS Activa de Navio2 que se muestra a continuación:



Figura 53 – Antena activa GNSS Navio2

La antena GNSS debe estar conectada al puerto MCX en la parte superior de Navio2.

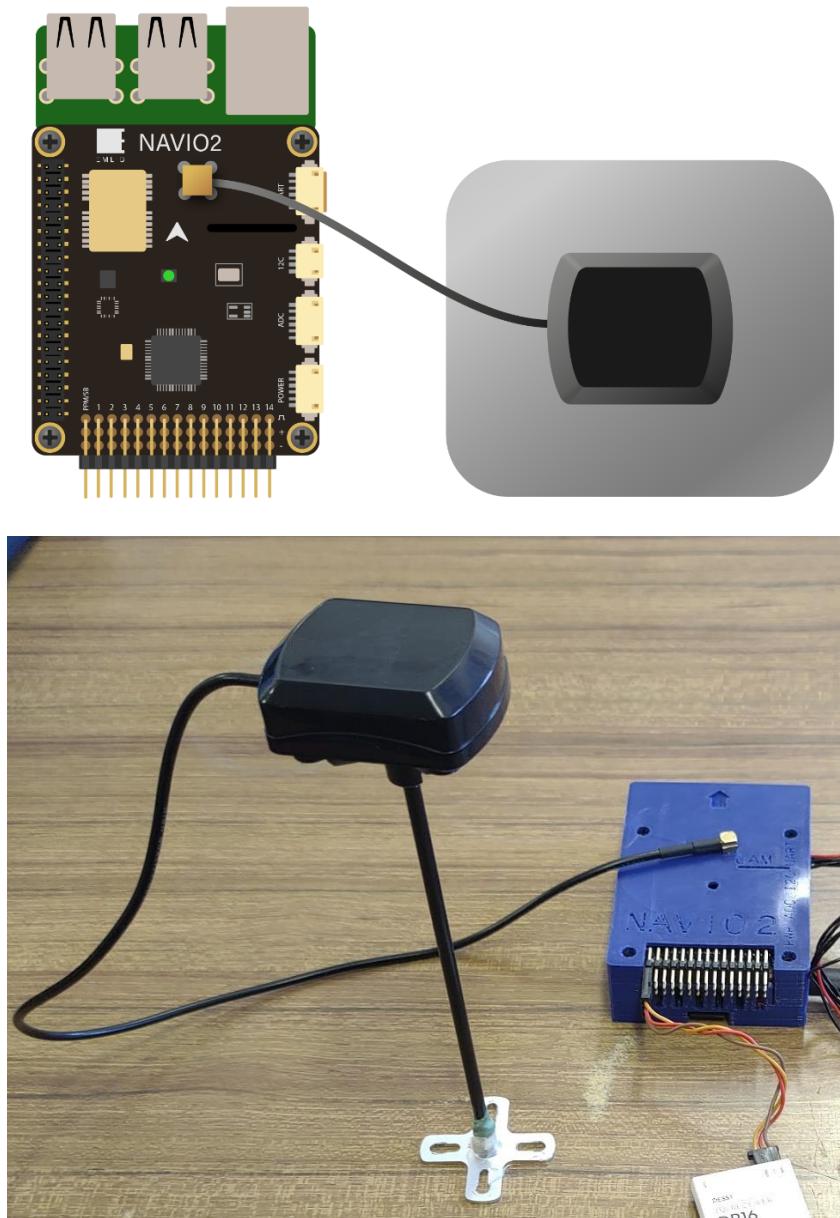


Figura 54 – Conexión de la Antena GNSS del Navio2

3.6.1 Montaje

El elemento más sensible de la instalación es la colocación de la antena. Una antena bien colocada es crucial para lograr buenos resultados de posicionamiento. La antena debe tener una vista clara del cielo. No debe haber obstáculos que puedan bloquearla.

Los dispositivos electrónicos pueden producir ruido de RF que podría afectar la recepción de la señal GNSS. Mantendremos los componentes del dron lo más lejos posible de la antena, especialmente los ESC dado que podrían afectar a la recepción de la señal GNSS.

La antena debe colocarse opcionalmente en un plano de tierra que reduzca las trayectorias múltiples, proporcione blindaje y mejore la recepción de la señal. El plano de tierra es una placa conductora (70x70 mm), que puede ser una pieza de metal. En nuestro caso instalamos la antena en un soporte vertical a fin de proporcionar una vista clara del cielo sin obstáculos, luego fijamos el

soporte al marco superior del dron haciendo uso de la cinta adhesiva de espuma de doble cara (cinta 3M).

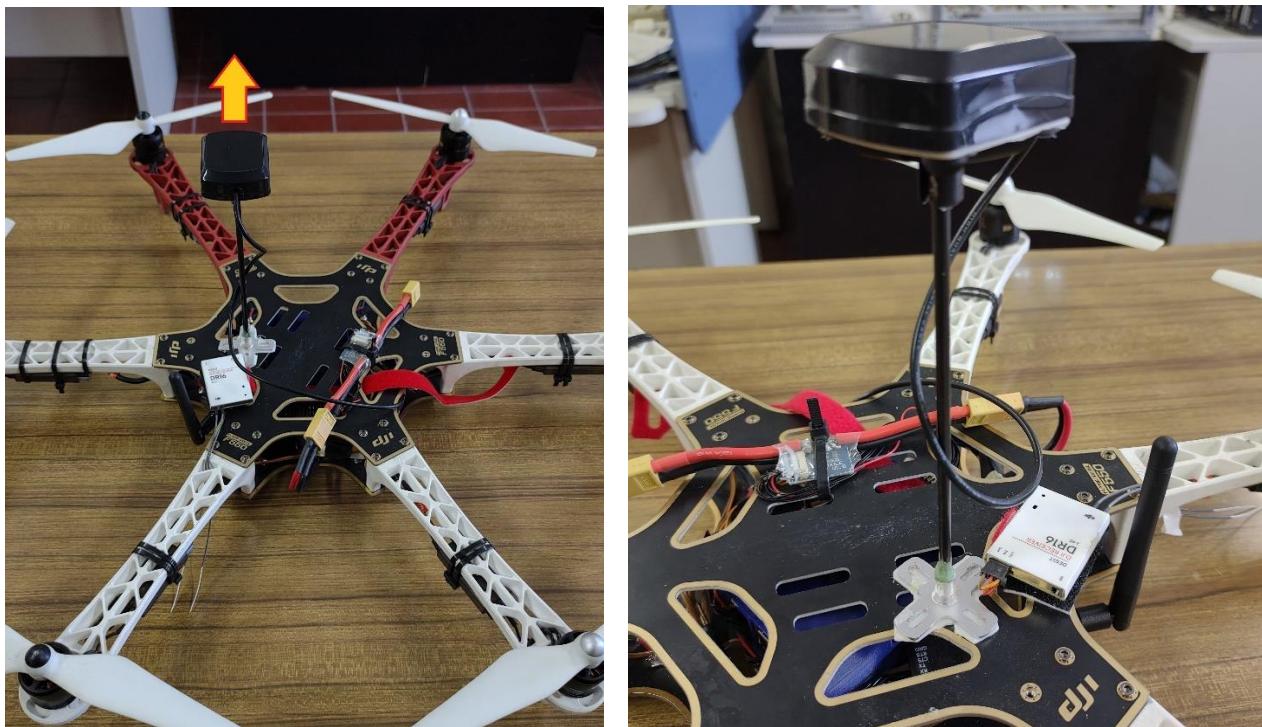


Figura 55 – Montaje Antena GNSS

Como se muestra en la Figura 55, la antena GNSS debe orientarse hacia el frente o nariz del dron. En nuestro caso, la antena no tiene ninguna flecha que indique el frente, pero hemos averiguado que el frente apunta hacia el lado opuesto de donde sale el cable de conexión a fin de orientar el magnetómetro que lleva incorporado, tal como se muestra en la imagen.

3.7 Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación de energía está compuesto por una batería LiPo y un módulo de energía o alimentación.

3.7.1 Módulo de Alimentación

El módulo de alimentación es básicamente una fuente de alimentación regulada de 5V con sensores de voltaje y corriente incluidos. Toma el voltaje de la batería (por ejemplo, 14.8V para una batería 4S) como entrada y proporciona una salida regulada de 5V para alimentar la controladora de vuelo y los sensores internos, así como cualquier otro dispositivo externo conectado a la controladora de vuelo; tales como sensores externos, el receptor RC, el módulo de telemetría, etc. El controlador de vuelo puede leer, desde los sensores de voltaje y corriente incluidos en el módulo de potencia, el voltaje real y el consumo de corriente actual del dron y usar estos datos para estimar la energía restante de la batería y también el tiempo de vuelo disponible.

El módulo de alimentación es una forma sencilla de ofrecer al dron una alimentación limpia a partir de una batería de Li-Po, así como la medición del consumo de corriente y voltaje de la batería, todo

a través de un cable de 6 hilos. El módulo de alimentación viene completamente montado con conectores XT60, y envuelto en un termocontraíble para protección.



Figura 56 – Módulo de Alimentación

3.7.2 Montaje Módulo de Alimentación

Navio2 tiene tres fuentes de alimentación, todas ellas se pueden utilizar simultáneamente ya que están protegidas por diodos.

Para fines de prueba y desarrollo podemos conectar un cargador de 5V 1A al puerto microUSB de la Raspberry Pi. Raspberry Pi proporcionará energía al Navio2.

Para el funcionamiento del dron debe utilizarse un módulo de alimentación conectado al puerto "POWER" en Navio2. En este caso, Navio2 proporcionará energía a la Raspberry Pi.

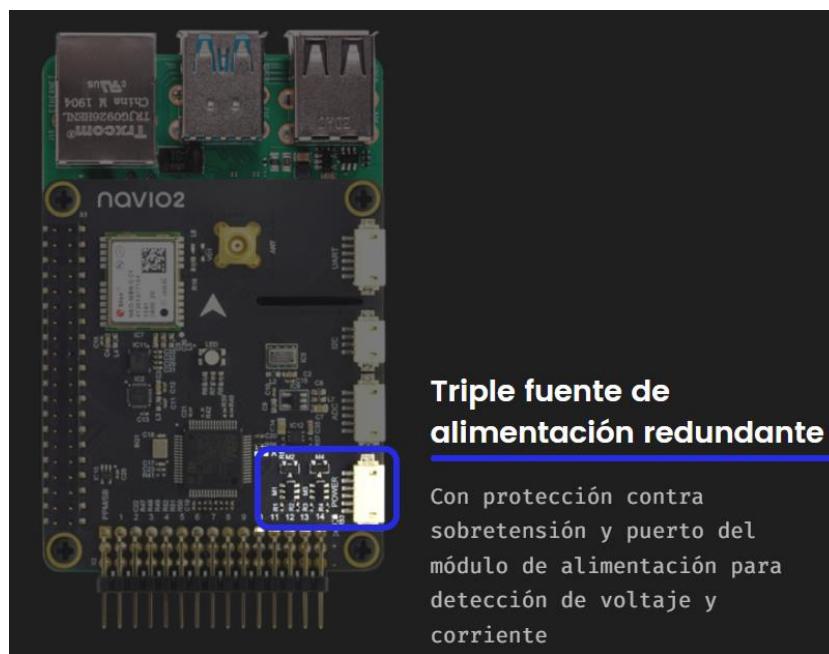


Figura 57 – Puerto de alimentación (POWER) del Navio2

En nuestro caso, colocamos el módulo de alimentación en el marco superior del hexacóptero DJI F550 dado que la batería LiPo irá montada en la parte superior del dron. Uno de los conectores XT60 se utilizará para alimentar a todos los ESC y motores mediante el cable de conexión a los terminales positivo y negativo del marco inferior que habíamos colocado anteriormente. Luego, el

cable de 6 pines del módulo se conectará al puerto “POWER” del Navio2 a fin de proporcionar una tensión regulada de 5V.

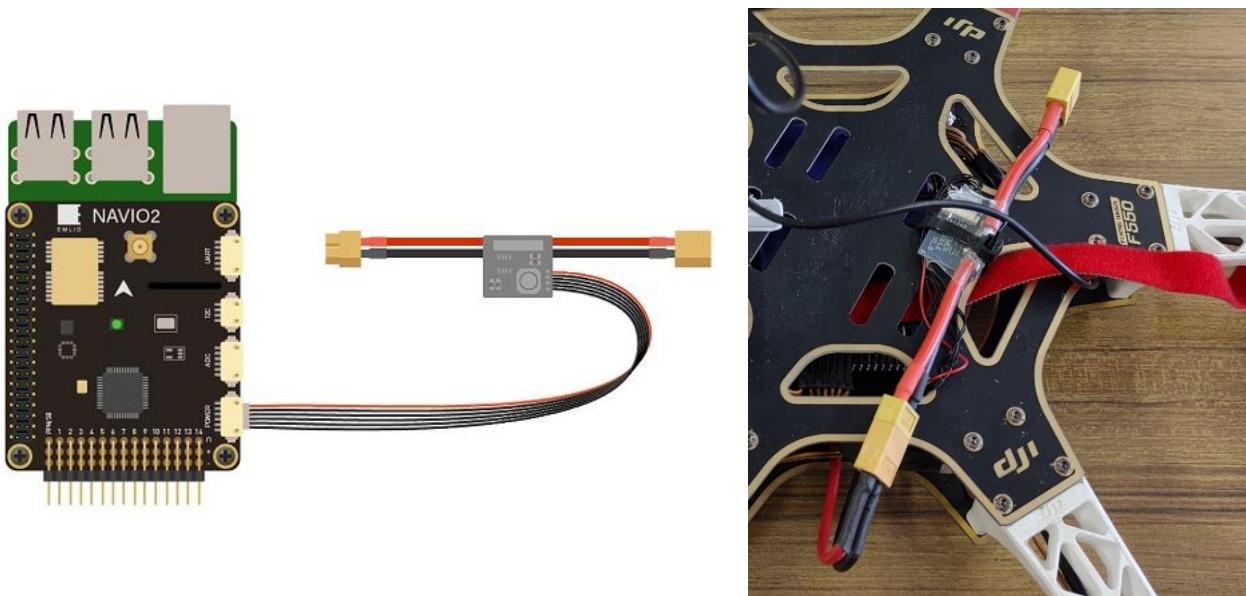


Figura 58 – Montaje Módulo de Alimentación

3.7.3 Baterías

Las fuentes de alimentación que se utilizarán para el Hexacóptero DJI F550 son baterías de Polímero de Litio (LiPo) las cuales son ampliamente utilizadas en el mundo del radiocontrol por su alta densidad de energía, alta velocidad de descarga y peso ligero.

Generalmente las baterías LiPo cuentan con un cableado principal y un cableado de balance y, además, llevan impresas en su cubierta sus especificaciones: su capacidad expresada en miliamperios hora (mAh), su voltaje, bien indicado explícitamente o bien implícitamente si sólo se menciona el número de celdas (1S, 2S, etc.) y su capacidad de descarga, esto es, la velocidad a la que es capaz de entregar la energía sin dañarse.

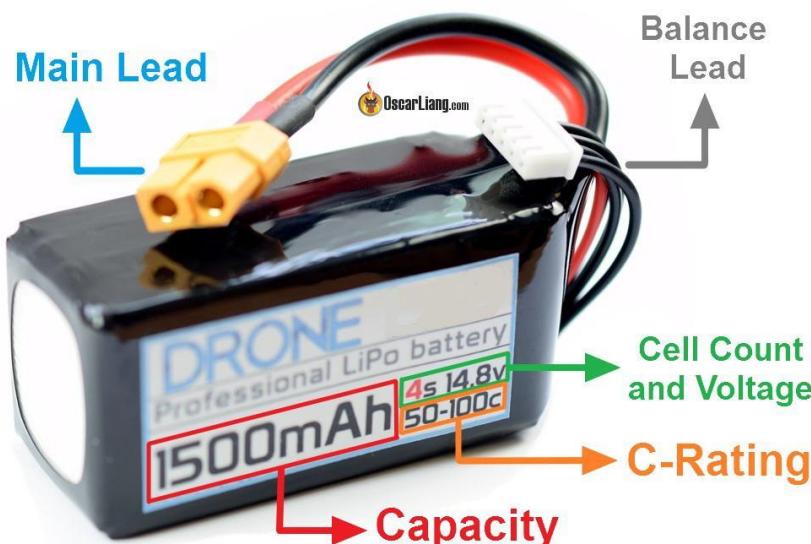


Figura 59 – Bases de una Batería LiPo

Voltaje de la batería y número de celdas (S)

Las baterías LiPo usadas en RC están compuestas de celdas individuales conectadas en serie. Cada celda tiene un voltaje nominal de 3.7 V, por lo tanto, el voltaje se define simplemente como la cantidad de celdas de la batería, también conocido como su número "S". Así tenemos:

- ✓ 1S = 1 celda = 3.7 V
- ✓ 2S = 2 celdas = 7.4 V
- ✓ 3S = 3 celdas = 11.1 V
- ✓ 4S = 4 celdas = 14.8 V
- ✓ 5S = 5 celdas = 18.5 V
- ✓ 6S = 6 celdas = 22.2 V

El voltaje afecta directamente la velocidad de los motores del dron, así que usando baterías con más S se puede aumentar la velocidad del multicóptero si es que los ESC y el resto de la electrónica soporta este voltaje más alto.

Capacidad de la batería

La capacidad de una batería LiPo se mide en *mAh* (*miliamperios hora*) que es básicamente una indicación de que valor de corriente se puede extraer de la batería en una hora hasta que esta se descargue completamente. Por ejemplo, una LiPo de 1300 mAh se descargaría completamente en una hora si se extraen 1,3 A de ella. Si la corriente extraída se doblase (2.6 A), el tiempo se reduciría a la mitad.

Incrementar el tamaño de la batería podría incrementar el tiempo de vuelo, pero también aumenta el tamaño y peso, que a su vez disminuye el tiempo de vuelo.

C Rating – Velocidad de descarga

Todas las baterías LiPo para drones vienen con un C Rating. Conociéndolo, así como la capacidad de la batería, podemos calcular en teoría cual es la descarga máxima segura que se puede realizar de forma continua de una batería LiPo.

$$\text{Máxima Descarga} = \text{C Rating} \times \text{Capacidad}$$

Por ejemplo, una batería de 1300 mAh con un C Rating de 50C tiene una descarga máxima continua de 65 A.

Si el C Rating es demasiado bajo, la batería no podrá entregar la corriente que necesitan los motores y el dron no tendrá potencia. Puede incluso dañarse la batería si la corriente de salida excede su rating de seguridad.

Conectores y línea de balance

- Conector principal

Tanto la batería como el dron deben tener el mismo tipo de conector. Típicamente las baterías LiPo vienen con dos juegos de cables, unos para la carga y otros para la descarga (excepto las baterías 1S que sólo tienen un juego). Hay unos cuantos conectores diferentes entre los que se puede elegir. En nuestro caso, utilizaremos los conectores XT60.



Figura 60 – Conectores XT60

El conector XT-60 está formado por conectores de oro de gran calidad envuelto en una carcasa de nylon que resiste altas temperaturas (80°C). Es ideal para aplicaciones de corriente de hasta de 60 A constante y algo más de pico máximo, con tensiones de 12 a 24 VCC.

Este diseño de conector, por su construcción evita la posibilidad de invertir la polaridad por error en las conexiones de las baterías LiPo, cuando son conectadas al conector de alimentación de los ESC y motores. Disponen también de marcas de polaridad continua (+ y -) en los laterales de ambos conectores.

- Línea de balance

La línea de balance es principalmente usada en la carga para asegurarse que todas las celdas se carguen por igual. También permite monitorizar el voltaje de cada celda.

El número de cables en la línea de balance empieza en 3 para una batería 2S. Cada nueva celda que tenga la batería exige un cable adicional en la línea de balance. Por ejemplo, para una batería de 4 celdas (4S), la línea de balance es de 5 cables.

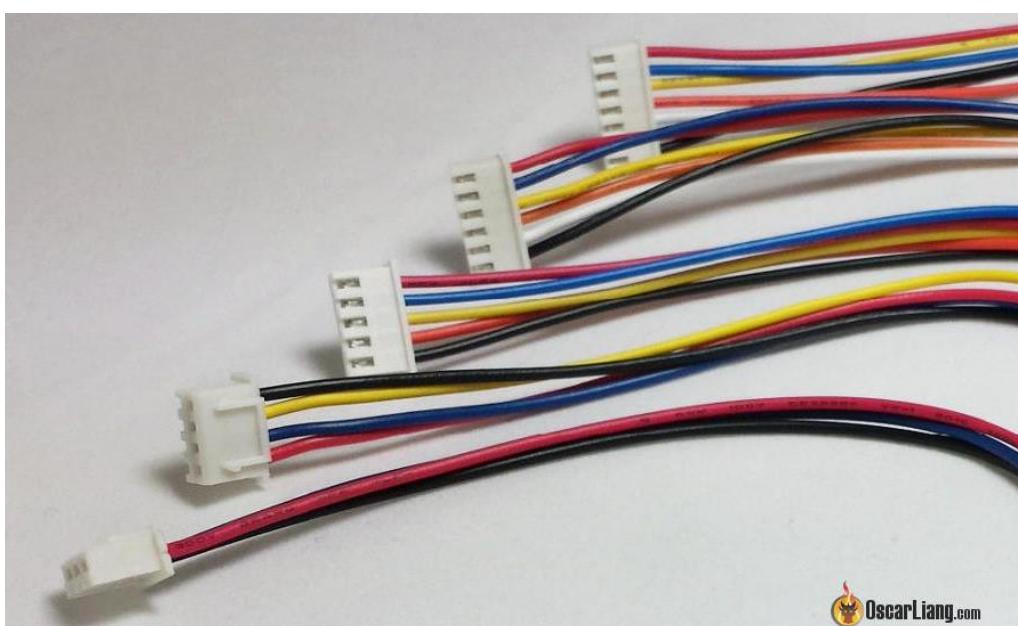


Figura 61 – Línea de Balance

3.7.4 Baterías LiPo 4S 4000 mAh

En nuestro caso, disponemos de 2 baterías LiPo, marca “Gens Ace” de 4 celdas y 4000 mAh de capacidad. Proporcionan un voltaje nominal de 14,8 V (4x3,7V) y el voltaje máximo de carga es de 16,8 V (4x4,2V). Estas baterías proporcionarán energía a todo el sistema de vuelo de nuestro dron.



ESPECIFICACIONES

- ✓ **Marca:** Gens Ace.
- ✓ **Modelo:** B-25C-4000-4S1P
- ✓ **Número de Celdas:** 4 (4S).
- ✓ **Voltaje Nominal:** 14.8 V.
- ✓ **Capacidad:** 4000 mAh.
- ✓ **C Rating:** 25C.
- ✓ **Conector Principal:** XT60.
- ✓ **Línea de Balance:** 5 cables.

Figura 62 – Baterías LiPo

Montaje

Debido a las limitaciones de espacio, la batería de alimentación se colocó en la parte superior del dron, más precisamente en el centro, a fin de garantizar una distribución uniforme del peso. Por lo tanto, fijamos la batería en el marco superior del hexacóptero DJI F550 en línea con el frente o nariz del dron y para ello utilizamos una cinta de velcro y un par de precintos reutilizables (tipo retráctil). Esto es así porque debemos poder desmontar la batería fácilmente a fin de cargarla o reemplazarla por otra unidad previamente cargada.



Figura 63 – Montaje Batería LiPo

De la Figura 63, vemos que la batería está fijada en línea con el eje de simetría del dron a fin de equilibrar el peso de la estructura. La línea de balance queda desconectada dado que no se utiliza en el funcionamiento de la aeronave, sin embargo, es necesario conectarla al sistema de carga de la batería, como veremos más adelante. Cuando no utilicemos el dron, la batería siempre estará desconectada como se ve en la imagen de la izquierda, pero cuando deseemos iniciar un vuelo, la batería deberá conectarse para energizar todo el sistema tal como se muestra en la imagen a la derecha.

3.8 Cargador Baterías SKYRC AC/DC 100 W

Es de vital importancia asegurar la carga de baterías, y no basta con que haya algo de energía almacenada, sino que existe la necesidad de que haya un mínimo para que todo el sistema pueda alimentarse correctamente. Debido a que el sistema es de cuatro celdas, se requiere de 3.575 V para cada una, por lo que necesitaremos un total de 14.3 V como mínimo recomendado para un vuelo seguro.

Las baterías que utilizamos tienen la capacidad de soportar perfectamente hasta 16.8 V, por lo que serán cargadas hasta ese punto. Estas baterías requieren de un proceso especial de carga, y es por eso que necesitaremos, además de la fuente de alimentación, un cargador LiPo (Lithium Polymer) con equilibrador.

En nuestro caso, disponemos del **SKYRC D100 AC/DC Dual Balance Charger/Discharger** que es un cargador de 2 canales con dos circuitos independientes que pueden cargar 2 baterías de distinto tipo (LiPo/ LiHV/ LiFe/ Lilon/ NiMH/ NiCd/ Pb) simultáneamente. Es capaz de funcionar como una fuente de alimentación con una salida máxima de 100 W que permite alimentar un equipo de CC. Además, se puede usar como medidor de batería de litio y medidor de resistencia interna de la batería. Hay límite de corriente de carga automática, límite de capacidad, umbral de temperatura y límite de tiempo de procesamiento que hace que el cargador sea más seguro de usar.



Figura 64 – Cargador de Batería SKYRC D100

Para su funcionamiento, el cargador SKYRC D100 contiene los siguientes elementos.

- 1- Cargador SKYRC D100.
- 2- Adaptador XH x2 (para conexión de la línea de balance).
- 3- Cable de Carga x2.
- 4- Cable de Carga con conectores XT60 a banana x2.
- 5- Cable de alimentación del cargador.



Figura 65 – Componentes del Cargador SKYRC D100

3.8.1 Modo de operación

A continuación, se explica cómo configurar el cargador de manera rápida para iniciar una carga.



Figura 66 – Configuración del Cargador SKYRC D100

Las funciones de cada botón son las siguientes:

- CH A / CH B: se usa para cambiar del Canal A al Canal B o viceversa.
- BATT PROG / STOP: se usa para detener el progreso de carga o para ir a un paso/pantalla anterior.
- DEC: se usa para pasar por los menús y decrementar el valor del parámetro.
- INC: se usa para pasar por los menús e incrementar el valor del parámetro.
- ENTER / START: se usa para ingresar un parámetro o almacenar un parámetro en pantalla.

Para modificar el valor de un parámetro en el programa, debemos presionar el botón ENTER/START para que parpadee y luego cambiamos el valor presionando los botones DEC e INC. El valor se almacenará al volver a presionar el botón START/ENTER. Si hay otro parámetro que se puede modificar en la misma pantalla, cuando se confirme el valor del primer parámetro, el siguiente valor del parámetro comenzará a parpadear, lo que significa que está listo para modificarse.

Para iniciar el proceso de carga, hay que mantener presionado el botón ENTER/START durante 3 segundos, luego el sistema verificará los parámetros de carga y la línea de balance y, si todo está en orden, nos pedirá que confirmemos la carga presionando el botón ENTER/START nuevamente. Cuando se requiera detener el progreso o volver al paso/pantalla anterior, hay que presionar el botón BATT PROG/STOP una vez.

Línea de balance

El cable de balance conectado a la batería debe conectarse al cargador con el cable negro alineado con la marca negativa. El siguiente diagrama muestra la forma correcta de conectar una batería de 3 celdas al SKYRC D100 mientras se carga.



Figura 67 – Conexión Línea de Balance

NOTA: Si no conectamos la batería a la línea de balance del Cargador, el proceso de carga no iniciará.

Modos de carga

El Cargador SKYRC D100 permite configurar diversos modos de carga para las baterías LiPo.

- ✓ **Carga Normal (CHARGE):** Este modo de carga es para cargar baterías LiPo/LiFe/Lilon/LiHV en modo normal.

- ✓ *Carga Balanceada (BAL CHARGE)*: El cargador monitoriza el voltaje de cada celda y las puede cargar individualmente intentando mantener el mismo voltaje en todas las celdas. Este es el método recomendado y más seguro para cargar una batería LiPo.
- ✓ *Carga Rápida (FAST CHG)*: La batería se carga a través de la línea principal y el cargador no chequea el voltaje de cada celda. Esto es normalmente más rápido, pero puede producir que las cargas de las distintas celdas no estén equilibradas y que la batería no se cargue al 100 %.
- ✓ *Carga de Almacenaje (STORAGE)*: El cargador carga todas las celdas a la carga de almacenaje, que es entre 3.80 y 3.85 V.
- ✓ *Descarga (DISCHARGE)*: El cargador intenta “drenar” la batería LiPo muy lentamente, incluso más que la carga.

3.8.2 Proceso de carga

Hay dos formas principales de configurar el cargador.

- 1) Un perfil de memoria está disponible para configurar y almacenar información pertinente de hasta 20 baterías diferentes, cada canal puede almacenar 10 configuraciones. Una vez que la información de una batería se almacena en una memoria, se conservará hasta que se vuelva a cambiar manualmente.
- 2) Si no se desea utilizar las memorias de la batería, este cargador se puede configurar manualmente antes de cada uso.

En nuestro caso, usamos un perfil de memoria para almacenar los parámetros de carga de nuestra batería LiPo 4S de 4000 mAh con los siguientes valores.

- *Tipo de Batería*: LiPo.
- *Modo de Carga*: BALANCE CHG.
- *Corriente de Carga*: 1 A.
- *Número de Celdas*: 4S.

Una vez configurados los parámetros de carga, procedemos a iniciar el proceso de carga presionando el botón ENTER/START por 3 segundos y nos aparecerá una nueva pantalla donde “R” muestra el número de celdas detectadas por el cargador y “S” es el número de celdas establecidas por nosotros en la pantalla anterior. Si ambos números son idénticos, presionamos ENTER/START para iniciar el proceso de carga.

Durante el proceso de carga, un Monitor de Estado de Carga en tiempo real se mostrará en la pantalla.



Figura 68 – Proceso de Carga Batería LiPo

Finalmente, el cargador nos avisará cuando la batería esté completamente cargada mediante una alarma sonora; en nuestro caso la carga termina cuando el voltaje de la batería llegue a los 16,8 V.

4.0 SOFTWARE/FIRMWARE

Hasta ahora se habló de los conceptos básicos de un dron y de los componentes de hardware de nuestro multicóptero. En este apartado, nos centraremos en el software y el firmware que debemos instalar para poder hacer uso del dron, realizar las calibraciones necesarias y monitorear el vuelo. Por un lado, tenemos el firmware del autopiloto que debe ejecutar la controladora de vuelo y se trata de un sistema operativo específico para la Raspberry Pi que permitirá realizar la configuración del tipo de vehículo, administrar las comunicaciones con la Estación de Control Terrestre y actualizar el firmware a la versión más reciente. Por otro lado, tenemos el software de la Estación de Control Terrestre (GCS: Ground Control Station) que puede ejecutarse en una PC o tablet Android y se trata de un programa que nos permitirá realizar las calibraciones necesarias del dron, monitorear el vuelo y enviarle órdenes.

En nuestro caso haremos uso de los siguientes recursos:

- **FIRMWARE Autopiloto: Emlid Raspbian (ArduPilot)**
- **SOFTWARE GCS Estación de Control Terrestre: QGroundControl**

4.1 Firmware Autopiloto

El firmware que utilizaremos en el procesador de vuelo es Emlid Raspberry Pi OS Buster (conocido como Emlid Raspbian) y se puede descargar en la página oficial de emlid, en el apartado de configuración ([Emlid Raspberry Pi OS Buster \[XZ, 662 MB\]](#)). Raspbian es un sistema operativo libre basado en Debian y optimizado para el hardware de Raspberry Pi. El hecho de usar Emlid-Raspbian y no otro tipo de Raspbian, es porque este en concreto ha sido modificado por Emlid para que la Raspberry trabaje en tiempo real. Navio2 requiere un Sistema Operativo Raspberry Pi preconfigurado para ejecutarse y Emlid Raspbian es un sistema operativo con tecnologías de Ardupilot y ROS (Robot Operating System).

4.1.1 ¿Por qué Ardupilot?

Ardupilot es el software de piloto automático de código abierto más avanzado y con todas las funciones. Con Navio2, su código se ejecuta directamente en la Raspberry Pi con kernel Linux. Permite configurar hasta 6 tipos de vehículos, diversos modos de vuelo y navegación por waypoints. Como dijimos, Ardupilot es software libre cuya función es ser el autopiloto del vehículo de tal manera que, si ajustamos el modo de funcionamiento del dron a alguno de los ya definidos por el fabricante, el vehículo es capaz de autogestionarse como, por ejemplo, el modo “PosHold” en el que el dron deberá mantenerse estable en el aire forzando aquellos motores que más lo necesiten en caso de perder estabilidad. Por otra parte, cabe destacar que *ArduCopter* (vehículo configurable que utilizamos en nuestro proyecto) es un subsistema que hereda de Ardupilot y que se utiliza para todos los vehículos multirrotores que comparten semejanza con un helicóptero. Así pues, existen también otras familias dentro de Ardupilot, ellas son: *ArduPlane* para aeroplanos, *ArduRover* para los vehículos terrestres y los acuáticos no sumergibles y, por último, *ArduSub* para vehículos submarinos.

Para *ArduCopter*, podemos nombrar algunos modos de funcionamiento del dron:

- **AltHold (Altitude Hold):** se encarga de mantenerse a la altura actual sin tener en cuenta la posición.
- **PosHold (Position Hold):** se encarga de mantener la posición fija, estabilizándose en el aire y contrarrestando las posibles ráfagas de viento.
- **Guided:** el modo guiado se activa usando la aplicación de control terrestre (como QGroundControl) y el radio de telemetría. Permite mandar órdenes interactivas al dron para guiarlo a una localización haciendo click en el mapa de la estación terrestre o trazando una ruta específica.
- **RTL (Return To Launch):** su principal función es elevarse a una determinada altura (por defecto 10 metros) para así evitar posibles obstáculos y, una vez alcanzada esa altura, desplazarse hasta el punto de despegue. Dependiendo de la configuración insertada en el vehículo, éste puede mantenerse en el aire esperando a que el usuario lo aterrice manualmente.

4.1.2 Configuración de Raspberry Pi

Navio2 requiere un sistema operativo Raspberry Pi preconfigurado para ejecutarse, por lo tanto, debemos descargar la imagen preconfigurada del Raspberry Pi OS que proporciona el fabricante bajo el nombre de [Emlid Raspberry Pi OS Buster \[XZ, 662 MB\]](#). El sistema operativo viene sin GUI (Graphical User Interface), ya que no es necesario para aplicaciones de drones. Una vez descargada la imagen, es necesario grabar el archivo en una tarjeta microSD que será insertada en el slot de la Raspberry Pi. Para mayor comodidad podemos retirar la controladora de vuelo del marco o simplemente desconectamos todos los componentes salvo la antena GNSS, dado que puede provocar la aparición de ondas reflejadas que dañen la placa Navio2.

Para grabar la imagen del sistema operativo en la tarjeta microSD, tenemos que realizar los siguientes pasos:

- 1- Descargar la última imagen de Emlid Raspberry Pi OS Buster.
- 2- Descargar la herramienta [Etcher](#) a la PC. Extraemos y ejecutamos con derechos de administrador.
- 3- Insertamos la tarjeta microSD a la PC. Se recomienda que sea como mínimo de 8 GB.
- 4- Seleccionamos el archivo con la imagen y la letra de la unidad correspondiente a la tarjeta microSD.
- 5- Iniciamos la grabación haciendo click en *Flash!*.
- 6- Finalizada la grabación, retiramos la tarjeta microSD de la PC y la insertamos en la Raspberry Pi.

NOTA: Para más detalles, ver el siguiente video https://www.youtube.com/watch?v=i8_TFYWYt_M

Una vez instalado el sistema operativo en la Raspberry Pi, procedemos a encenderla y debemos verificar si existe alguna actualización de sistema. Para acceder a la consola del sistema operativo de la Raspberry Pi es necesario disponer de una serie de accesorios:

- Un Monitor o Pantalla con entrada HDMI y el correspondiente Cable HDMI.
- Un Teclado estándar con conexión USB
- Una Fuente de Alimentación, con salida micro USB de 5.1 V.
- Un Cable de Red Ethernet para conectar la Raspberry Pi a un router con acceso a internet.

Luego de conectar el monitor por HDMI, el teclado por USB y el cable de red por el puerto ethernet, procedemos a encender la Raspberry Pi conectando la fuente de alimentación. Una vez que inicie el sistema, nos aparecerá en pantalla un mensaje de bienvenida y los pasos a seguir para realizar las configuraciones básicas.

```

#      #      #      #      # ##### #####
##      #      # * #      #      #      #
# #      #      # * #      #      #      #
#      #      # * #      #      #      #
#      #      # * #      #      #      #
#      #      # * ##### #      #      #      #
#      ## #      #      #      #      #      #
#      #      #      #      # ##### #####
STEP 1:
Choose your vehicle and ArduPilot version using emlidtool
(Please, read carefully all options and select appropriate one for either Navio 2 or Navio+)
- sudo emlidtool ardupilot

STEP 2:
Set your GCS IP
- sudo nano /etc/default/arducopter
- sudo nano /etc/default/arduplane
- sudo nano /etc/default/ardurover
- sudo nano /etc/default/ardusub

STEP 3:
Reload configuration by issuing these commands
- sudo systemctl daemon-reload

Launch, and enable on boot

- sudo emlidtool ardupilot

IMPORTANT:

To show this message one more time type "sudo emlidtool ardupilot help"

* Documentation: https://docs.emlid.com/

```

Figura 69 – Pantalla inicio Emlid Raspberry Pi OS Buster

Para poder ingresar comandos, el sistema nos solicitará un usuario y contraseña. Los valores por defecto son:

- ✓ Usuario: “**pi**”
- ✓ Contraseña: “**raspberry**”

Después de iniciar sesión en el sistema, es necesario verificar si existe alguna actualización de sistema operativo. Para ello, debemos ejecutar el siguiente comando:

`sudo apt-get update && sudo apt-get dist-upgrade`

Finalizado el proceso, reiniciamos la placa con el siguiente comando:

`sudo reboot`

4.1.3 Instalación y ejecución

Para ejecutar Ardupilot debemos configurar el tipo de vehículo que vamos a utilizar, luego el código del piloto automático funcionará directamente en la Raspberry Pi. Emlid Raspberry Pi OS tiene Ardupilot preinstalado e incluye las versiones actuales de los vehículos que se listan a continuación.

- ArduCopter: 4.0.3
- ArduPlane: 4.0.5
- ArduRover: 4.0.0
- ArduSub: 4.0.1

A continuación, se muestran algunas configuraciones típicas para los vehículos.

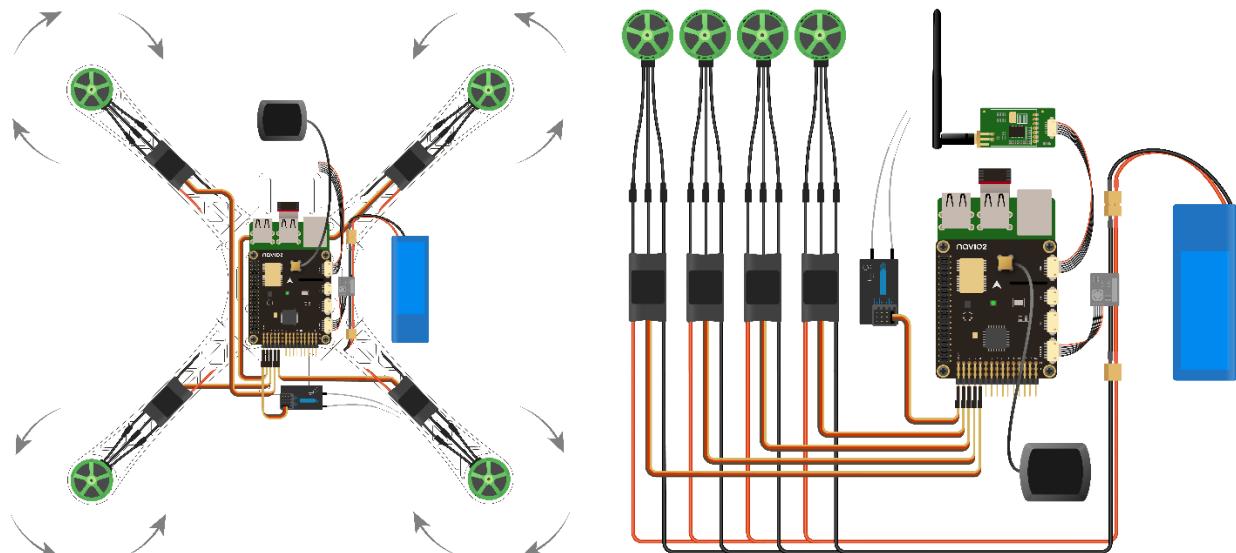


Figura 70 – ArduCopter: Configuración Quadcopter

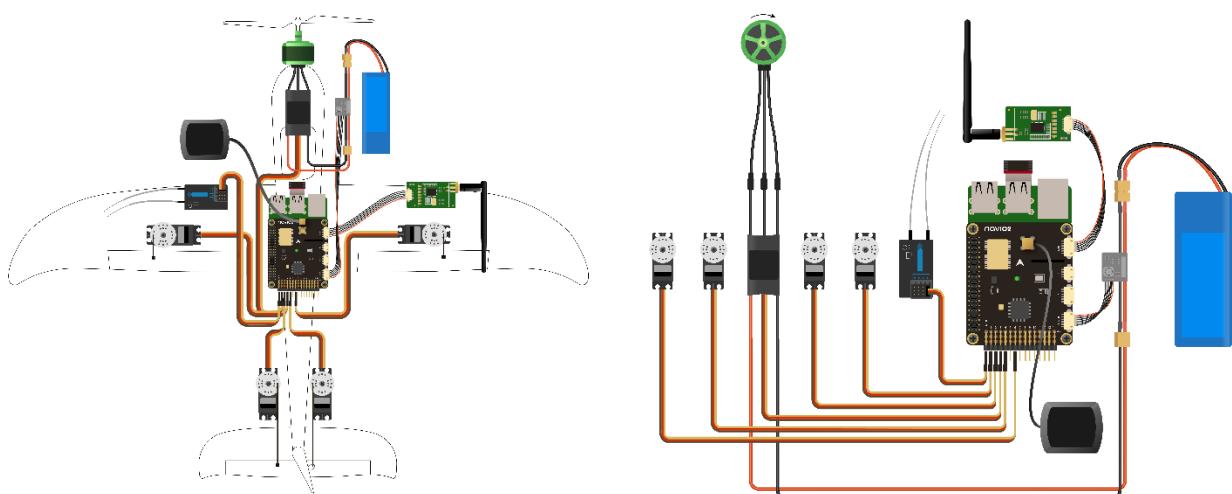


Figura 71 – ArduPlane: Configuración Plane

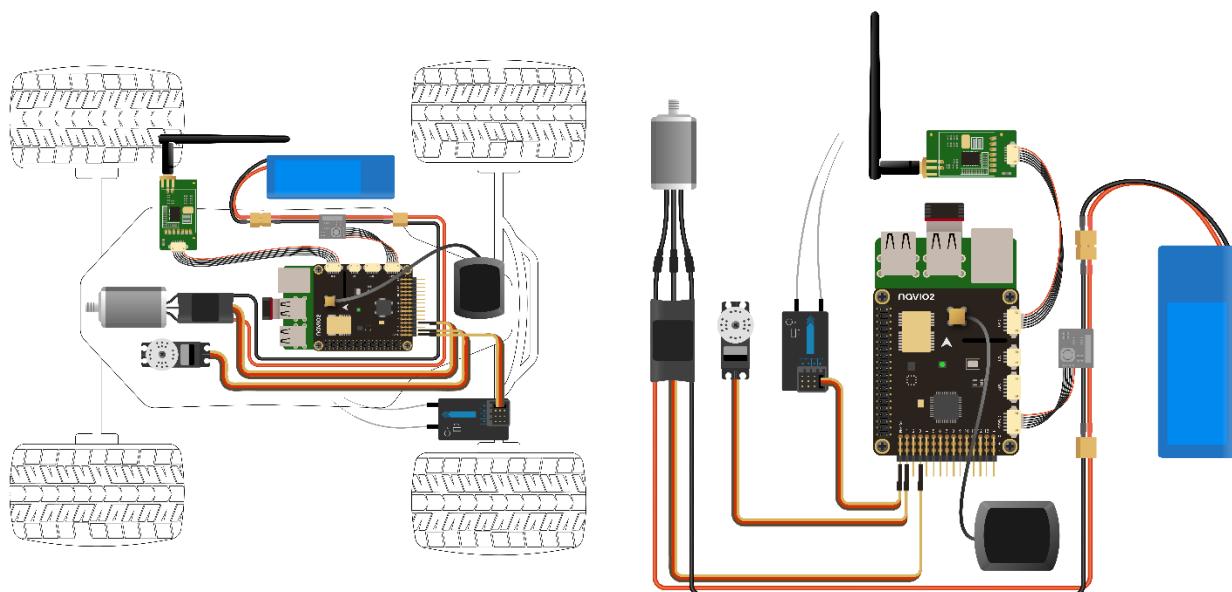


Figura 72 – ArduRover: Configuración Rover

Una vez que reiniciamos la placa, es necesario ingresar nuevamente usuario y contraseña para habilitar la consola de comandos. Luego, para seleccionar el vehículo que se lanzará por defecto, debe ejecutarse el siguiente comando:

```
sudo emlidtool ardupilot
```

Este comando debería abrir el menú de configuración de Ardupilot, sin embargo, primero verificará su firmware RCIO (módulo de kernel Linux para Raspberry pi que le permite comunicarse con los módulos de Navio2) para ver si está actualizado. Si no está actualizado, se nos preguntará si queremos actualizarlo y tendremos que confirmar (Yes) para que Ardupilot funcione correctamente.

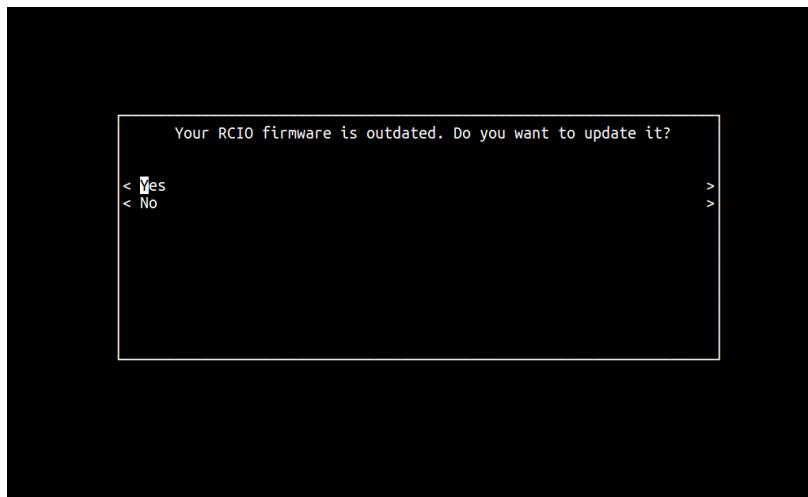


Figura 73 – Actualización del Firmware RCIO

Una vez que haya finalizado la actualización, se ejecutará el comando `sudo emlidtool ardupilot` y producirá la siguiente salida por pantalla:

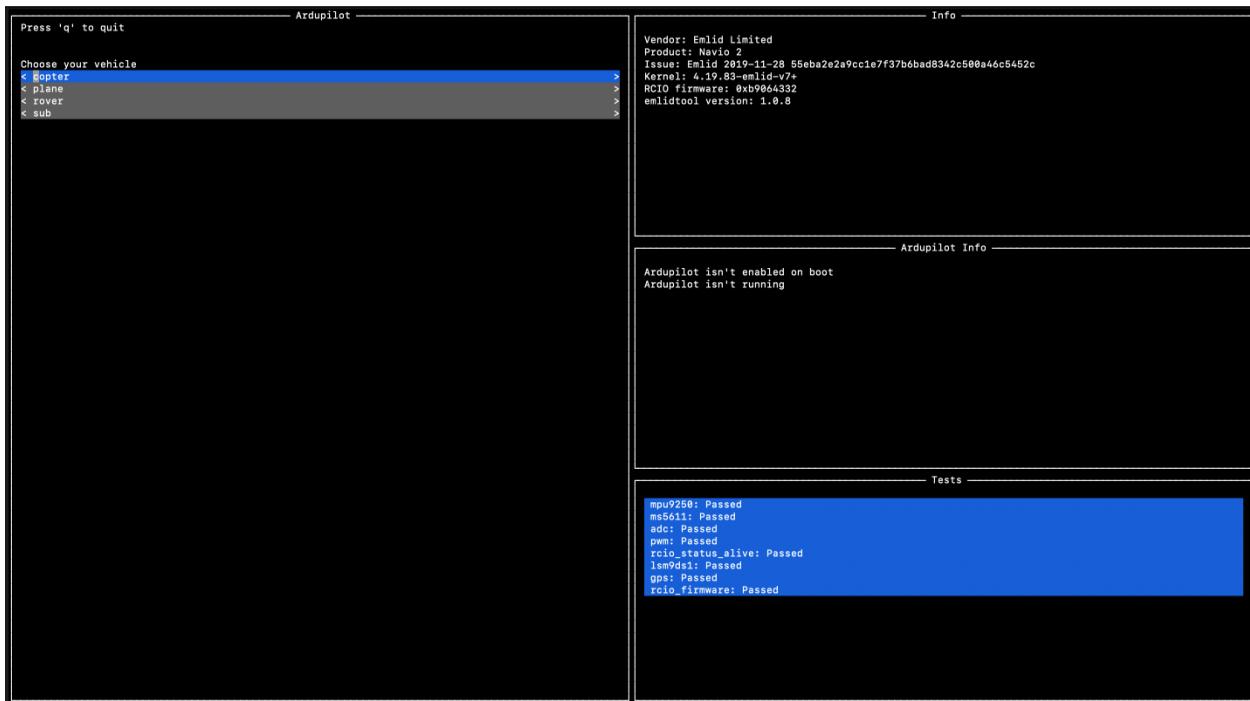


Figura 74 – Emlidtool_Pantalla Menú Configuración Ardupilot

Lo que se muestra en la pantalla de configuración de Ardupilot es Emlidtool. Emlidtool es una utilidad preinstalada que facilita la experiencia con el piloto automático. Esta herramienta tiene cuatro opciones disponibles:

- **Ardupilot:** ayuda a configurar y habilitar Ardupilot en el arranque. Puede ejecutarse con el siguiente comando:

```
emlidtool ardupilot configure
```

Luego, abre la interfaz gráfica de usuario y permite configurar el tipo de vehículo, versión del firmware, habilitar en el arranque, etc.

- **Info (Información):** muestra información sobre el sistema. Puede ejecutarse con el siguiente comando:

```
emlidtool info
```

- **Ardupilot Info:** muestra el estado actual de Ardupilot.
- **Tests (Pruebas):** ejecuta pruebas sencillas en el dispositivo. Puede ejecutarse con el siguiente comando:

```
emlidtool test [sensors]
```

También se puede especificar qué sensores desea probar.

Ahora necesitamos configurar ardupilot. En primer lugar, tenemos que elegir el vehículo que vamos a volar (panel izquierdo), por lo tanto, elegimos “copter” (Choose your vehicle > “copter”) dado que nuestro proyecto se trata de un Hexacóptero. Después de elegir “copter” como vehículo, elegimos la última versión disponible de firmware (Choose your versión > “última versión 3.X”), luego nos pedirá seleccionar un tipo de marco o frame y elegimos “arducopter” (Choose your frame > “arducopter”). Continuando, lo siguiente que debemos especificar es si las opciones seleccionadas anteriormente se iniciarán cuando se inicie la Raspberry Pi. En nuestro caso, elegimos habilitar en el arranque (On boot > “enable”), sin embargo, si no queremos habilitar en el arranque, la siguiente es una lista de comandos que nos permitirán iniciar ardupilot:

<code>sudo systemctl start arducopter</code>	Permite iniciar la ejecución arducopter.
<code>sudo systemctl stop arducopter</code>	Permite detener la ejecución de arducopter.
<code>sudo systemctl enable arducopter</code>	Permite habilitar arducopter en el arranque.
<code>sudo systemctl disable arducopter</code>	Permite deshabilitar arducopter en el arranque.
<code>sudo systemctl is-enabled arducopter</code>	Permite verificar si arducopter está habilitado para iniciar en el arranque.

Figura 75 – Lista de comandos configuración ardupilot

Una vez que especificamos habilitar en el arranque, nos preguntará si nos gustaría iniciar ardupilot y seleccionamos inicio (Ardupilot > “start”). Por último, aparecerán las opciones de “Aplicar” o “Salir”, en este punto seleccionamos aplicar (> “Apply”) para configurar nuestras opciones para ardupilot.

Después de seleccionar aplicar, se configurará Ardupilot, realizará una serie de comprobaciones y se verán los cambios en el widget Ardupilot Info.

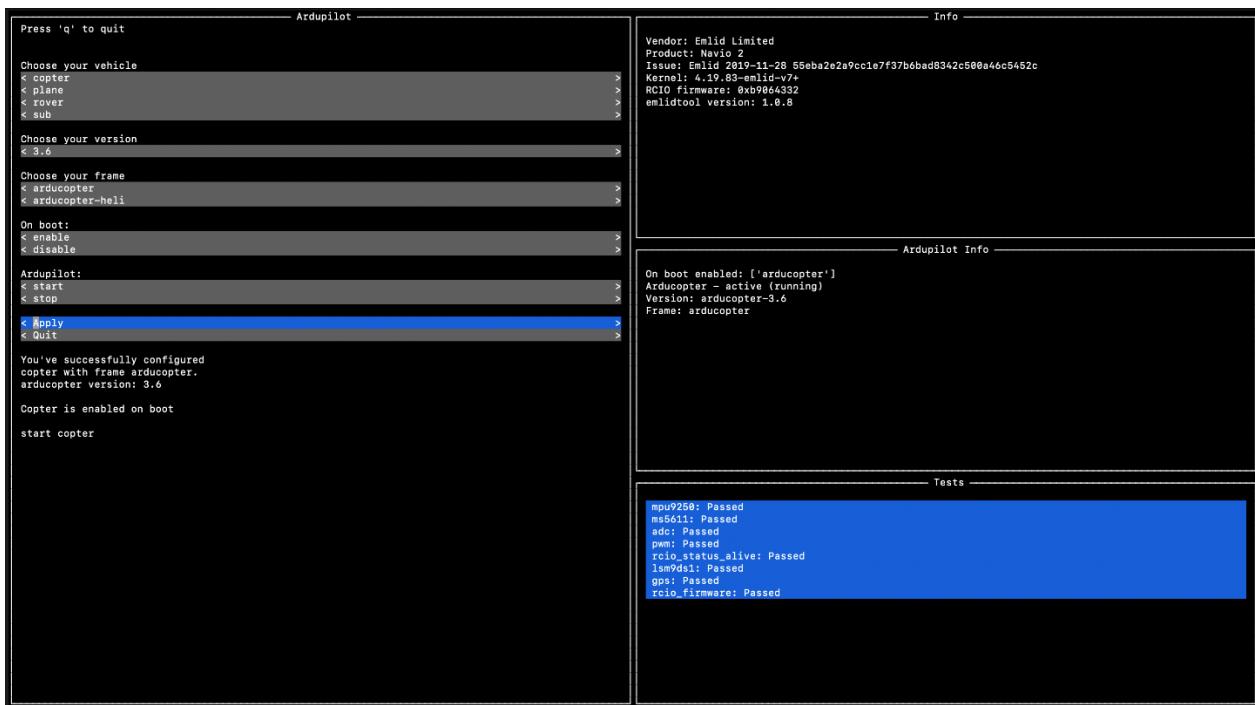


Figura 76 – Configuración de Ardupilot

NOTA: Si existe alguna falla en las pruebas (Tests) de hardware del Navio2, es recomendable verificar el montaje físico entre Navio2 y Raspberry Pi que debe estar fijado mediante tornillos. Si algún tornillo no está lo suficientemente ajustado, se producirá una falla en alguna de las comprobaciones de hardware.

Si todo está en orden, la Raspberry Pi mostrará un mensaje de éxito (“Passed”) en todas las pruebas, luego podemos seleccionar “Salir” o presionar la tecla “q” en el teclado.

4.1.4 Configuración del enlace a la GCS

Ahora que Ardupilot está configurado, a continuación, debemos realizar otra configuración para que la Raspberry Pi se conecte automáticamente al software que utilicemos como Estación de Control Terrestre (GCS: Ground Control Station) mediante un enlace inalámbrico. Para configurar la Raspberry Pi, ejecutamos el siguiente comando:

```
pi@navio: ~ $ sudo nano /etc/default/arducopter
```

Este comando nos permite acceder a un archivo de configuración que podemos editar para especificar el tipo de enlace que puede ser WiFi o Telemetría.

```

TELEM1="-A udp:127.0.0.1:14550"
#TELEM2="-C /dev/ttyAMA0"

# Options to pass to ArduPilot
ARDUPILOT_OPTS="$TELEM1 $TELEM2"

# -A is a console switch (usually this is a Wi-Fi link)

# -C is a telemetry switch
# Usually this is either /dev/ttyAMA0 - UART connector on your Navio
# or /dev/ttyUSB0 if you're using a serial to USB convertor

# -B or -E is used to specify non default GPS

```

Figura 77 – Archivo de configuración enlace GCS

Para configurar un enlace WiFi, debemos especificar la dirección IP de nuestra Estación de Control Terrestre (GCS) modificando la dirección IP predeterminada en la línea “TELEM1”. Por ejemplo, podríamos modificar la línea “TELEM1” de la siguiente forma:

```
TELEM1="-A udp:192.168.1.2:14550"
```

Donde el 192.168.1.2 es la dirección IP, el -A es el switch de consola para un enlace WiFi, udp es el tipo de protocolo de comunicación y 14550 es la velocidad en baudios. Debemos tener en cuenta que todas las líneas que comienzan con “#” están comentadas y no tienen ningún efecto. En nuestro caso vamos a utilizar el sistema de telemetría de 915 MHz para conectarnos al software GCS sin una conexión directa ni una conexión a internet. El software GCS que utilizaremos es QGroundControl que proporciona control de vuelo completo y planificación de misiones para cualquier dron habilitado para MAVLink. Para utilizar el enlace por Telemetría, necesitamos descomentar la línea “TELEM2” eliminando el “#”. No es necesario comentar la línea “TELEM1” dado que Ardupilot verifica los dos enlaces y si el WiFi no es válido, pasa a utilizar el enlace por Telemetría. Esta configuración es válida ya sea que tengamos el módulo de Telemetría conectado al puerto UART del Navio2 o a un puerto USB de la Raspberry Pi.

Ahora que la Raspberry Pi está configurada para conectarse a QGroundControl, finalmente necesitamos volver a cargar todas las configuraciones y opciones para que systemd funcione correctamente. Para ello utilizamos el siguiente comando:

```
pi@navio: ~ $ sudo systemctl daemon-reload
```

Este comando recargará el sistema sin tener que reiniciar el sistema. Con la Raspberry Pi configurada, volvemos a realizar las conexiones de todos los componentes de hardware tales como módulos de telemetría, receptor RC, ESC, y alimentación, pero sin conectar la batería todavía.

4.2 Software GCS - Estación de Control Terrestre

La Estación de Control Terrestre (GCS: Ground Control Station) es una parte externa del multicóptero, pero sigue siendo un elemento fundamental del él, dado que desde la GCS podemos programar el software del procesador de vuelo utilizado, controlar el vehículo, localizarlo, modificar sus protocolos o funciones, recibir datos de la aeronave, etc. Por otra parte, este segmento también es fundamental para la preconfiguración del dron, así como de su calibración. El software GCS es una aplicación que se ejecuta en una computadora personal (PC) o dispositivo móvil (Android) y realiza una variedad de funciones como mencionamos anteriormente.

Ardupilot se puede utilizar con muchas Estaciones de Control Terrestre. Los desarrolladores suelen utilizar un GCS de escritorio, ya que estos tienden a proporcionar un acceso más profundo a los parámetros de configuración del vehículo y a las funciones avanzadas de depuración. Si sólo se desea volar, podemos optar por usar una GCS que se ejecute en un sistema operativo móvil (iOS, Android).

A continuación, se listan algunos de los sistemas GCS más populares:

- **Mission Planner** (Windows, Linux, Android): este GCS es el más compatible y sigue de cerca las nuevas características y actualizaciones en Ardupilot. Se recomienda tanto para usuarios principiantes como para usuarios avanzados. Funciona mejor en el entorno Windows.



Figura 78 – Vista General Mission Planner

- **QGroundControl** (Windows, Mac OS X, Linux, Android e iOS): este GCS es el más popular para sistemas basados en Android y proporciona la mejor presentación en dispositivos de pequeño formato como smartphones. No tiene todas las capacidades de Mission Planner, pero tiene una interfaz más fácil de usar para algunas funciones. Funciona bien en todas las plataformas.

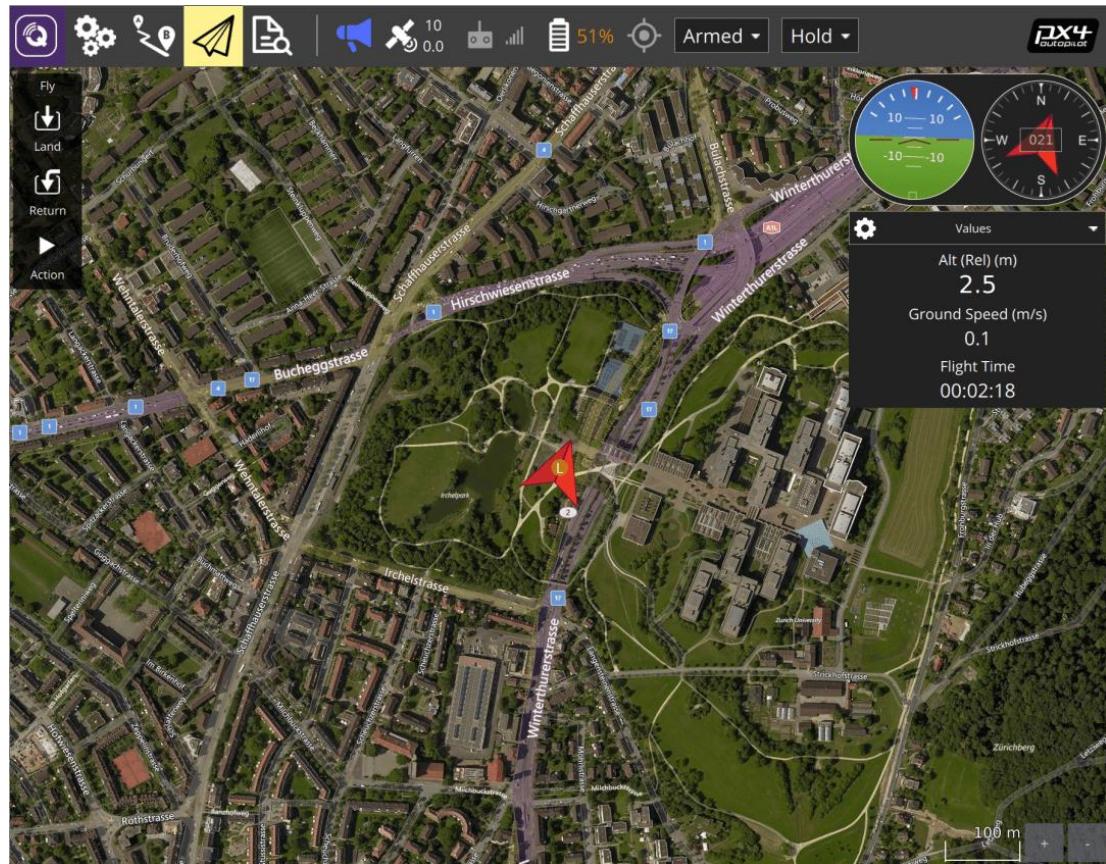


Figura 79 – Vista General QGroundControl

- **APM Planner 2** (Windows, Mac OS X, Linux): proporciona funcionalidad básica, pero actualmente no está bien mantenido y actualizado.

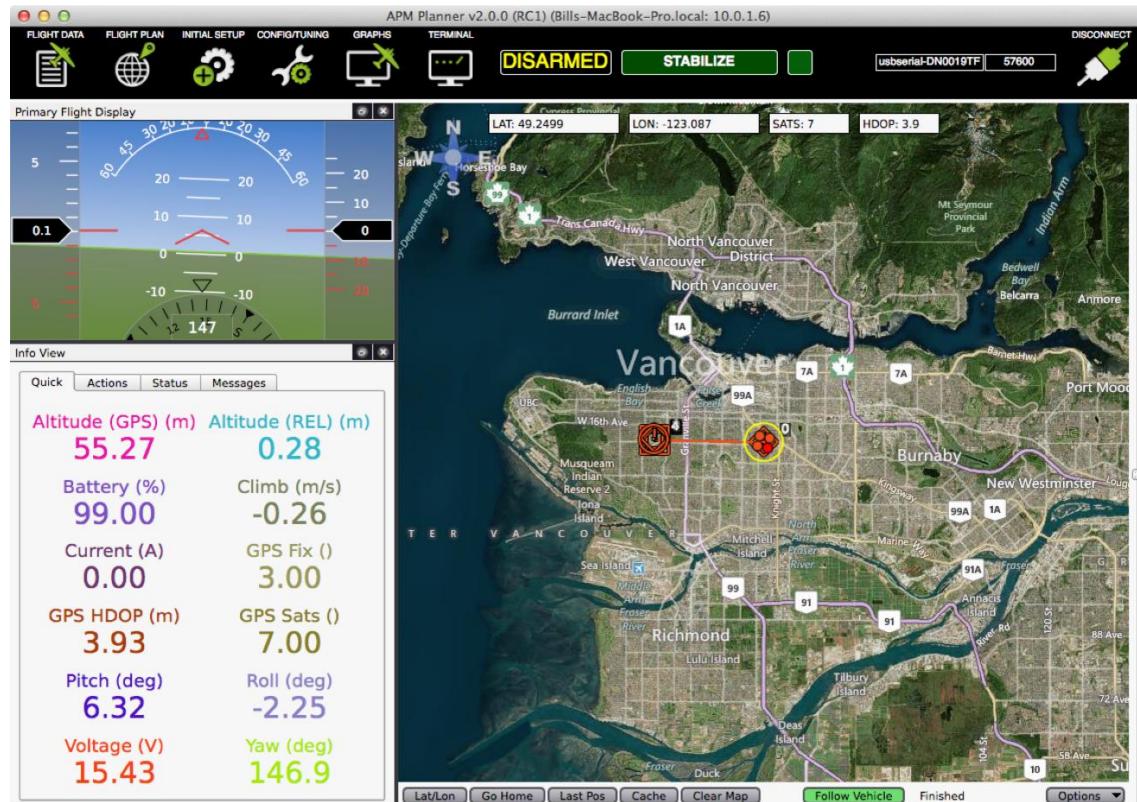


Figura 80 – Vista General APM Planner 2

Tal como hemos visto, existen diversas aplicaciones de Control Terrestre disponibles para los sistemas operativos más comunes (Windows, Linux, Mac OS X, Android y iOS). Las tres aplicaciones GCS que hemos listado anteriormente son de código abierto y no requieren una licencia comercial. Todas ellas ofrecen más o menos la misma funcionalidad: programación de firmware en la placa controladora de vuelo, configuración de parámetros de la aeronave, calibración de sensores, configuración y calibración del sistema RC, telemetría, gestión del modo de vuelo, navegación por waypoints GPS y control de misiones, posición global del vehículo mediante la visualización en un mapa, monitoreo de video FPV, etc. En general, todos estas GCS pueden ser usadas con hardware y firmware de controladoras de vuelo tanto de ArduPilot como de PX4, porque todos usan el protocolo MAVLink para comunicarse con los vehículos, para enviar comandos y la recepción de la telemetría y datos de parámetros; sin embargo, es posible que en algunos tipos de mensajes MAVLink no estén implementados en algunas de las aplicaciones GCS mencionadas o en los mismos controladores de vuelo mencionados.

4.2.1 QGroundControl

En nuestro proyecto, haremos uso del software QGroundControl como Estación de Control Terrestre para nuestro dron. Esto es así dado que la interfaz gráfica es más amigable e intuitiva para realizar las diversas configuraciones del multicóptero, además, hay mucha bibliografía disponible sobre esta herramienta de software. QGroundControl nos permitirá un control total del vuelo de la nave, su calibrado, toma de datos (posición, inclinación, consumo, etc.) y planificación de una misión, siempre y cuando la nave haga uso de MAVLink (Micro Air Vehicle Link). Como alternativa a QGroundControl, en el caso de que sólo se cuente con Windows como sistema operativo, se propone el uso de **Mission Planner**.

Características principales

QGroundControl proporciona control de vuelo completo y configuración del vehículo comandado por ArduPilot o PX4. Brinda un uso fácil y directo para principiantes y, a su vez, ofrece soporte de funciones de alta gama para usuarios experimentados. Sus características principales son:

- ✓ Instalación/configuración completa de vehículos con firmware ArduPilot o PX4 Pro.
- ✓ Soporte de vuelo para vehículos que ejecutan PX4 y ArduPilot (o cualquier otro piloto automático que se comunique utilizando el protocolo MAVLink).
- ✓ Planificación de la misión para el vuelo autónomo.
- ✓ Pantalla de mapa de vuelo que muestra la posición del vehículo, la pista de vuelo, los puntos de referencia y los instrumentos del vehículo.
- ✓ Transmisión de video con superposiciones de pantalla.
- ✓ Soporte para la gestión de múltiples vehículos.
- ✓ QGC se ejecuta en plataformas Windows, Mac OS X, Linux, iOS y Android.

4.2.2 Inicio rápido de QGroundControl

Para poner en marcha la aplicación, debemos seguir una serie de pasos:

- 1- Descargamos e instalamos la aplicación. En nuestro caso descargamos la versión para Windows del siguiente enlace [QGroundControl-installer.exe](#) o también podemos descargarlo del sitio web oficial de QGroundControl.
- 2- Encendemos la Controladora de Vuelo RbPi + Navio2 mediante la fuente de alimentación de 5.1 [V] con todos los componentes de hardware conectados a excepción de la batería. No conectamos la batería porque no hemos calibrado los ESC y entonces permanecerán emitiendo un sonido de alerta indicando que debemos calibrarlos.
- 3- Iniciamos la aplicación QGroundControl y, si todo está en orden, debe detectar el dron y conectarse a él automáticamente.

Al conectarse al dron, la aplicación verificará el estado de todos los sensores de la controladora de vuelo, los satélites disponibles, la fuente de alimentación, etc. Si el dron está listo para volar, QGroundControl debe mostrar Fly View como se muestra a continuación (de lo contrario, abrirá la vista de configuración).

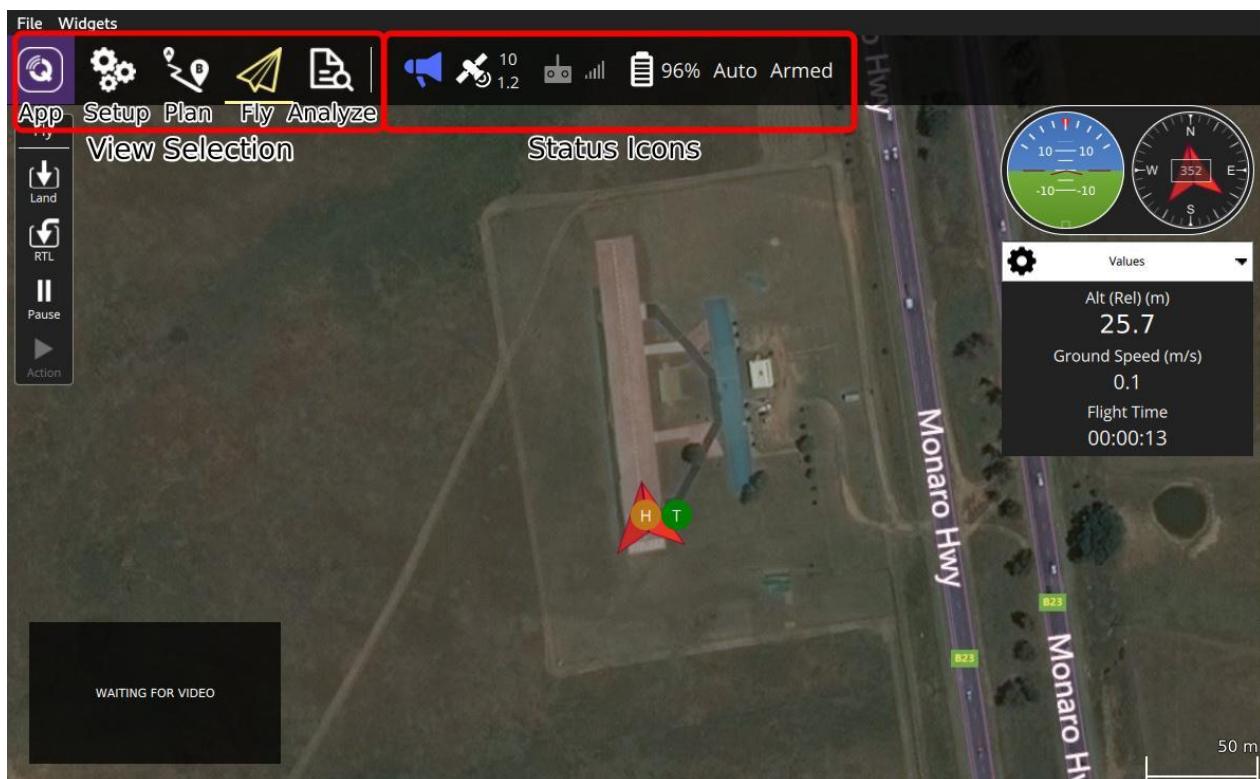


Figura 81 – Vista Fly View de QGroundControl para el dron listo para volar

Como se puede ver en la imagen anterior, podemos utilizar la barra de herramientas (View Selection) para seleccionar las diferentes vistas de la aplicación e información de estado de alto nivel para los vehículos conectados.

Iconos de visualización y selección

Los siguientes íconos se utilizan para cambiar entre las vistas principales. Estos se muestran incluso si ningún vehículo está conectado.

	<i>Settings</i>	Permite configurar la aplicación QGroundControl.
	<i>Setup</i>	Permite configurar y ajustar su vehículo.
	<i>Plan</i>	Permite crear misiones autónomas.
	<i>Fly</i>	Permite supervisar su vehículo mientras vuela, incluida la transmisión de video.
	<i>Analyze</i>	Permite descargar registros, geoetiquetar imágenes de una misión de inspección y acceder a la consola MAVLink.

Figura 82 – Iconos de visualización y selección

Iconos de estado

Los íconos de estado se muestran cuando QGroundControl está conectado a un vehículo. Estos muestran el estado de alto nivel del vehículo y se puede hacer click para ver información más detallada.

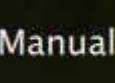
	<i>Mensajes del Vehículo</i>	Muestra una lista de mensajes del vehículo. El cartel de advertencia significa que hay mensajes críticos.
	<i>Estate del GPS</i>	Muestra el conteo de satélites y el HDOP (Dilución Horizontal de Precisión) actual.
	<i>RC RSSI (Received Signal Strength Indication)</i>	Información de intensidad de la señal RC.
	<i>Telemetría RSSI</i>	Información de intensidad de señales recibidas de Telemetría.
	<i>Batería</i>	Porcentaje de batería restante.
	<i>Modo de Vuelo</i>	Modo de vuelo actual. Con un click se puede cambiar el modo de vuelo.
	<i>Estado de Reconocimiento GPS RTK (Real Time Kinematic)</i>	Muestra el progreso del proceso de inicio de encuesta GPS RTK.

Figura 83 – Iconos de visualización y selección

4.2.3 Configuración y calibración del vehículo (Setup View)

Antes de iniciar un vuelo, lo primero que debemos hacer es configurar el dron y realizar las calibraciones de hardware necesarias. Para ello accederemos al Setup View para configurar nuestro

vehículo nuevo antes del primer vuelo y, además, nos permitirá realizar los ajustes necesarios cuando la aeronave ya esté configurada.

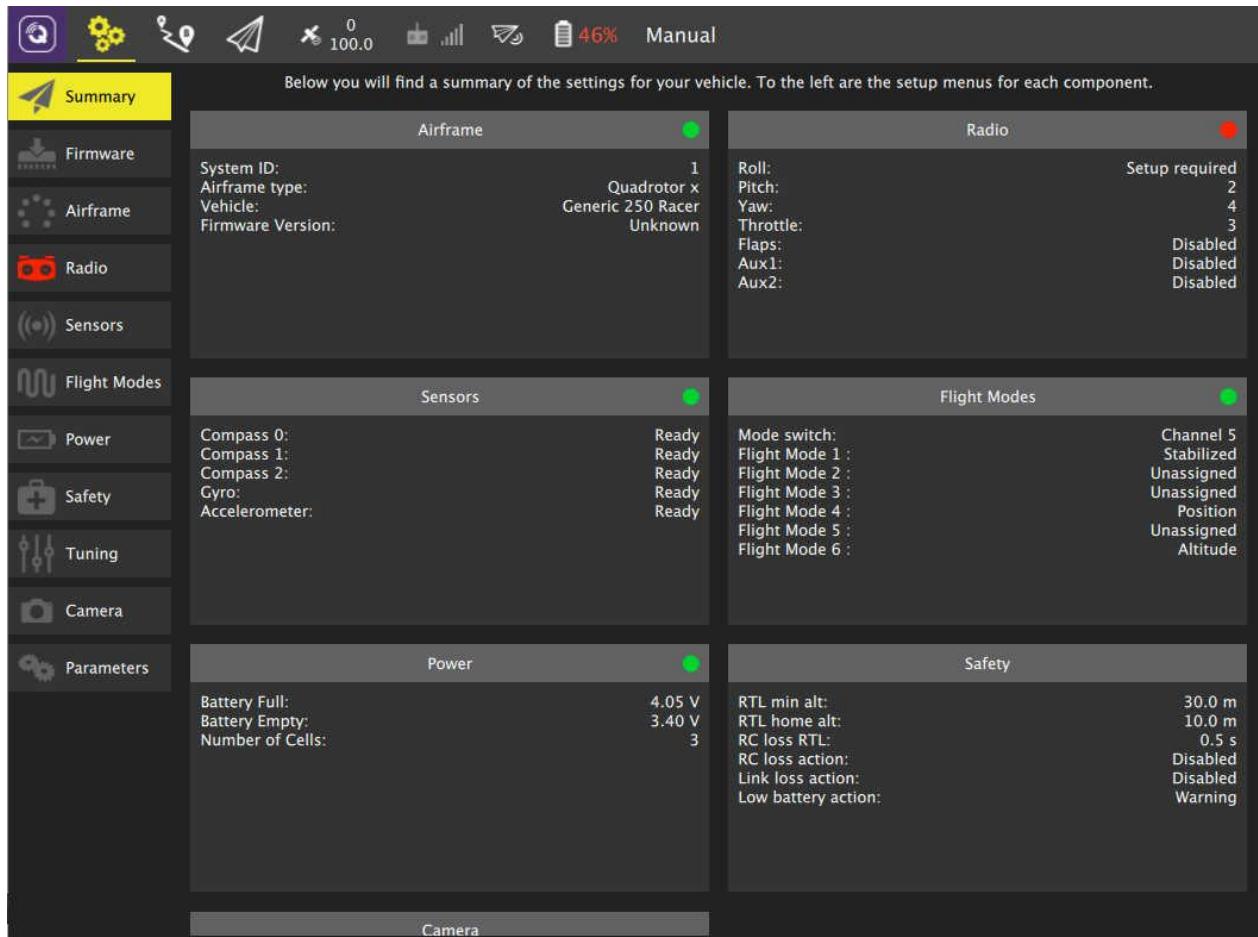


Figura 84 – Vista general del Setup View

Opciones de configuración

De la imagen anterior, podemos ver que a la izquierda de la pantalla se encuentra el conjunto de opciones de configuración disponibles. Un botón de configuración está marcado con un ícono rojo si todavía hay configuraciones que deben ajustarse/especificarse. No debemos volar si alguno de estos botones está en rojo. En la imagen de arriba, la configuración de radio aún no está completa. Cada uno de los apartados representan configuraciones que debemos verificar antes de realizar el primer vuelo y se explican a continuación:

- **Summary (Resumen):** Provee una descripción general de todas las opciones de configuración importantes para el vehículo. Al igual que los botones de configuración individuales, los bloques de resumen muestran un indicador rojo cuando esos ajustes no están completamente configurados.
- **Firmware Flash:** Permite cargar y actualizar el firmware del vehículo.
- **Airframe (Fuselaje):** Permite especificar el tipo de fuselaje o marco para el vehículo.
- **Radio:** Permite calibrar el transmisor del sistema de Radio Control.
- **Sensors (Sensores):** Permite calibrar los sensores del vehículo.

- **Flight Modes (Modos de Vuelo):** Se utiliza para asignar modos de vuelo a los interruptores del transmisor RC.
- **Power (Alimentación):** Permite realizar configuraciones de la batería de alimentación y opciones de energía adicionales, como la calibración ESC.
- **Motors (Motores):** Permite realizar pruebas y ajustes en los motores.
- **Safety (Seguridad):** Permite especificar configuraciones de las opciones relacionadas con la seguridad, tal como Volver a Casa (Return to Home) o A Prueba de Fallos (Failsafes).
- **Tuning (Puesta a Punto):** Permite ajustar las características de vuelo del vehículo.
- **Camera (Cámara):** Permite realizar ajustes para la cámara y el gimbal.
- **Parameters (Parámetros):** Permite modificar todos los parámetros asociados al vehículo.

Para el desarrollo de nuestro proyecto, se realizaron las configuraciones básicas para iniciar un vuelo seguro y las demás opciones de configuración se dejaron por defecto. Dado que el firmware lo hemos instalado tal como lo especifica el sitio web oficial de NAVIO2, no haremos uso del menú Firmware Flash de QGroundControl y las actualizaciones necesarias las haremos desde la consola de la Raspberry Pi. Por ello, pasaremos directamente a la configuración Airframe.

➤ 4.2.4 Airframe (Fuselaje)

La configuración del fuselaje difiere ligeramente según el firmware del controlador del vuelo utilizado, en nuestro caso nos centraremos en el **Fuselaje ArduPilot**.

La configuración del fuselaje se utiliza para seleccionar la clase y el tipo de bastidor que coincide con nuestro vehículo.

1. Primero seleccionamos el ícono del **engranaje** (Configuración del vehículo) en la barra de herramientas superior y luego en **Airframe** en la barra lateral.

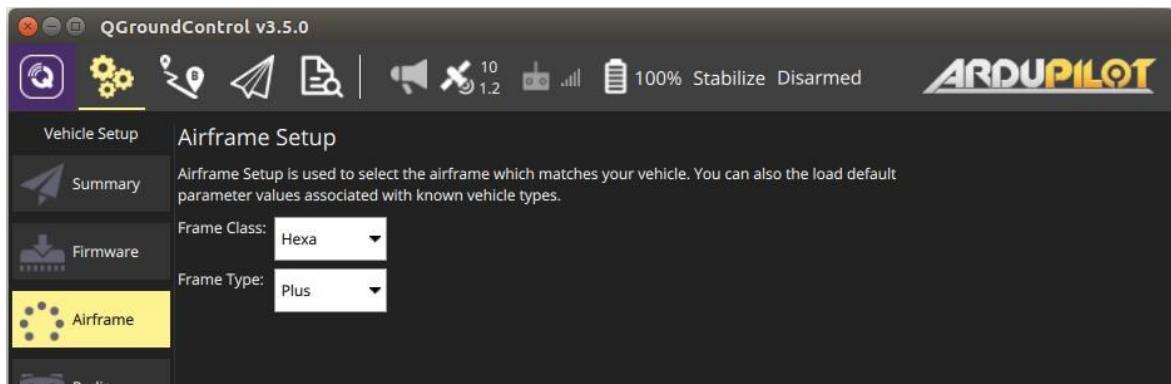


Figura 85 – Configuración Airframe (Fuselaje)

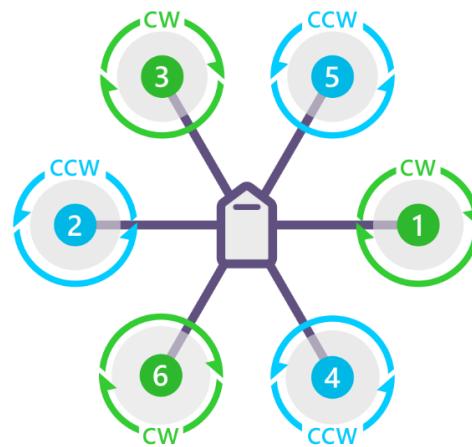
2. Seleccionamos la Clase de Bastidor o Marco para nuestro vehículo. Nuestro multicóptero es un Hexacóptero así es que la configuración sería la siguiente:

Frame Class: “Hexa”

3. Seleccionamos el Tipo de Bastidor específico para nuestro vehículo. Nuestro Hexacóptero usa la siguiente configuración:

Frame Type: “X”

Entonces, la configuración realizada debe responder a la siguiente disposición de los motores:



HEXA X

Figura 86 – Fuselaje para Hexacóptero en configuración “Hexa X”

➤ 4.2.5 Radio

La configuración de radio se utiliza para configurar el mapeo de las palancas de control (sticks) del control remoto (balanceo, cabeceo, guiñada y acelerador) a los canales, y para calibrar los ajustes mínimos, máximos de pwm para todos los demás controles del transmisor/canales RC.

El proceso de calibración es sencillo, el programa nos pedirá que movamos los sticks en un patrón específico que se muestra en un diagrama del transmisor en la parte superior derecha de la pantalla. Simplemente debemos seguir las instrucciones para completar la calibración. Entonces, para calibrar el sistema de radiocontrol debemos realizar los siguientes pasos:

1. Seleccionamos el ícono del engranaje (Configuración del vehículo) en la barra de herramientas superior y, a continuación, **Radio** en la barra lateral.
2. Encendemos el transmisor RC. En nuestro caso, se trata el Control Remoto DJI DT7.
3. Pulsamos OK para iniciar la calibración.

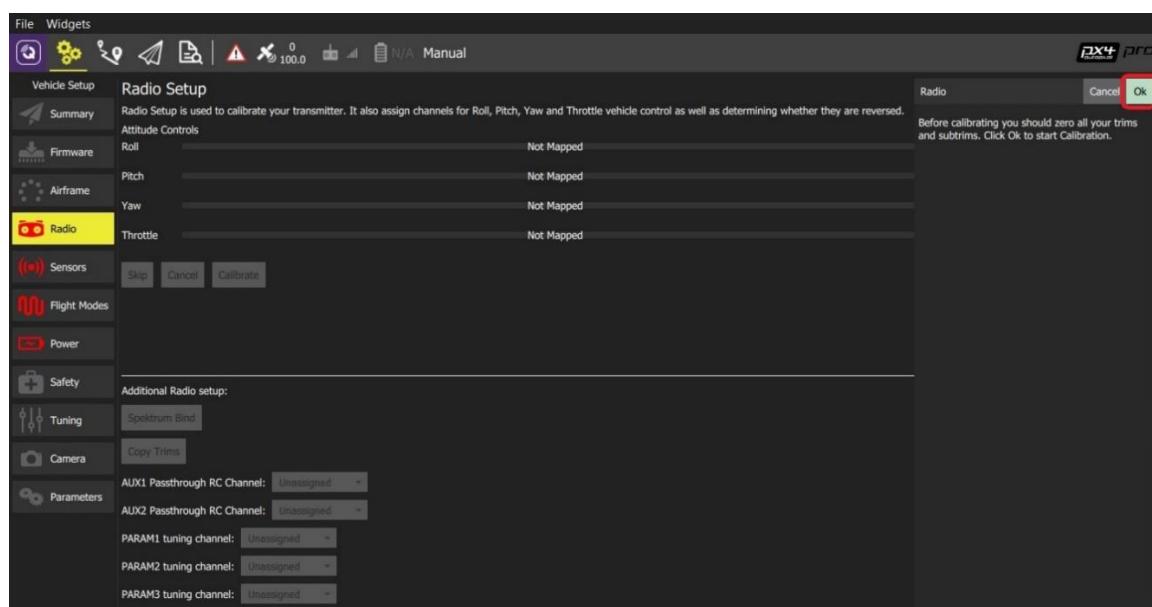


Figura 87 – Configuración del Sistema RC

4. Configuramos el botón de **transmitter mode** para que coincida con la configuración del transmisor (esto garantiza que QGroundControl muestre las posiciones correctas de la palanca para que las siga durante la calibración). En nuestro caso, usamos la configuración **Mode 2** para el botón transmitter mode.

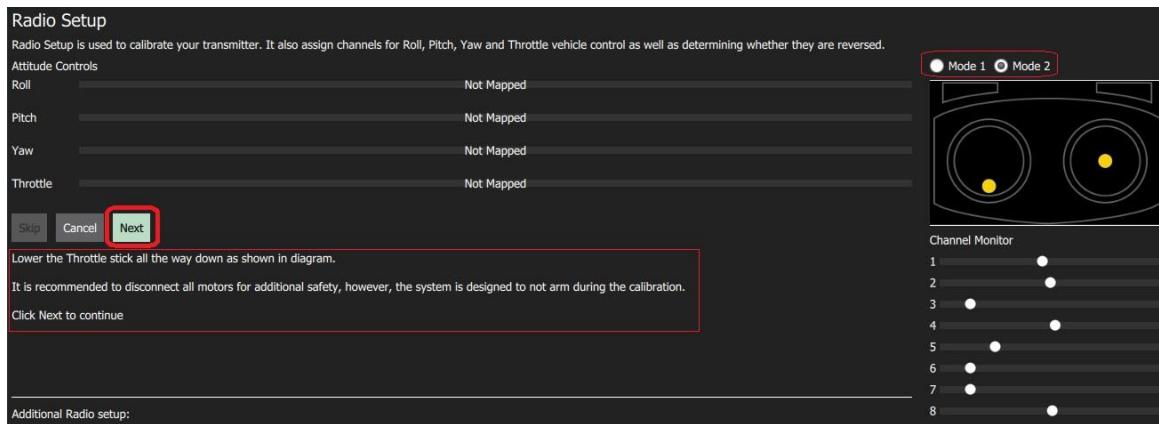


Figura 88 – Configuración Sticks del Radiocontrol

En cuanto a los modos de transmisión del Control Remoto, es necesario verificar qué canal/joystick hace determinada acción dado que existen dos modos de transmisión: Modo 1 y Modo 2.

En el *Modo 1*, el joystick izquierdo controla el cabeceo (pitch) y la guiñada (yaw), mientras que el joystick derecho controla el acelerador (throttle) y el balanceo (roll). Por otra parte, en el *Modo 2* (que es el más común), el acelerador (throttle) y la guiñada (yaw) están vinculados con el joystick izquierdo, mientras que el cabeceo (pitch) y el balanceo (roll) están vinculados con el joystick derecho.



Figura 89 – Modos de Transmisión RC

En nuestro caso, el manual del Control Remoto DJI DT7 especifica el Modo 2 para la distribución de los controles.

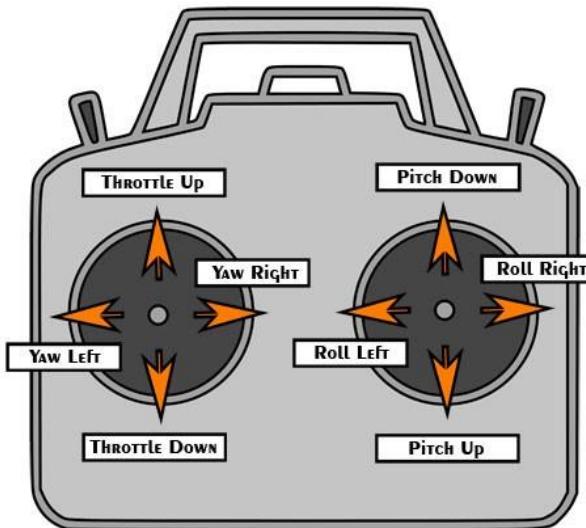


Figura 90 – Modo de Transmisión DJI DT7: Modo 2

5. Movemos los sticks a las posiciones indicadas en el texto y en la imagen del transmisor que muestra QGroundControl. Pulsamos **Siguiente** cuando los sticks estén en posición y repetimos lo mismo para cada una de las posiciones.
6. Cuando se nos solicite, movemos todos los demás interruptores y diales a través de su rango completo (también podemos observar cómo se mueven los sticks en el Monitor de Canal).
7. Presionamos **Siguiente** para guardar la configuración.

Una vez finalizada la calibración del sistema de RC, el siguiente paso es calibrar los Sensores y para ello habrá que mover el dron en los distintos ejes. Esto resulta complicado si tenemos el cable de alimentación de 5 V conectado a la Raspberry Pi, por lo tanto, resulta más cómodo conectar la batería para alimentar todo el sistema y desconectar el cable de alimentación de 5 V. Sin embargo, cuando conectemos la batería, los motores emitirán un sonido intermitente que nos alertará de que los ESC aún no están calibrados. Por lo tanto, el siguiente paso será calibrar los ESC y una vez completado en proceso, el sonido de alerta de los ESC se detendrá.

➤ 4.2.6 Calibración ESC (Controlador Electrónico de Velocidad)

Los controladores electrónicos de velocidad (ESC) se encargan de hacer girar los motores a la velocidad solicitada por el piloto automático. La mayoría de los ESC deben calibrarse para que conozcan los valores mínimos y máximos de PWM que enviará el controlador de vuelo.

NOTA: Es necesario realizar la calibración de Radio antes de realizar la calibración ESC.

La calibración ESC variará según la marca, por lo que siempre es recomendable consultar la documentación de la marca de ESC que estamos utilizando para obtener información específica (como tonos). Para el caso de los ESC **DJI 420 Lite**, la hoja de datos especifica los siguientes tonos musicales que nos dan información acerca de su estado.

Sonido		Descripción
Normal	♪1234 tonos musicales	Listo. Los ESCs están calibrados.
Anormal	BBBBBB... (tonos intermitentes infinitos)	No hay entrada de señal o la palanca del acelerador no está en la posición inferior.

Figura 91 – Descripción del sonido del ESC DJI 420 Lite

NOTA: Puede saber al instante cuál es el estado de la unidad al escuchar los sonidos emitidos por el ESC.

La calibración “all at once” (todo a la vez) funciona bien para la mayoría de los ESC, por lo que es una buena idea intentarlo primero, y si eso falla, podemos optar por el método manual “ESC por ESC”.

Advertencia: “Antes de calibrar los ESC, debemos asegurarnos de que el multicóptero no tenga accesorios y que el piloto automático NO esté conectado a la computadora a través de USB y que la batería LiPo esté desconectada.”

Calibración “todo a la vez”

- 1- Encendemos el transmisor y colocamos la palanca del acelerador al máximo (arriba al tope).



Turn transmitter on.
Set throttle to maximum.



Encendemos el Transmisor RC.
Ponemos el Acelerador al máximo.

Figura 92 – Transmisor RC en modo calibración ESC, Acelerador al máximo

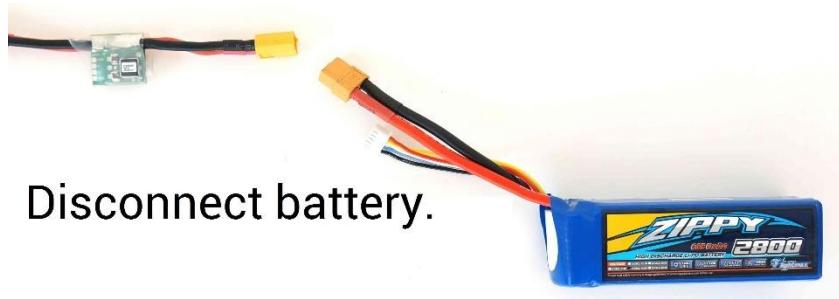
- 2- Conectamos la batería LiPo. Los LED rojos, azules y amarillos del piloto automático (Navio2 + RPi) se iluminarán en un patrón cíclico. Esto significa que está listo para entrar en modo de calibración ESC la próxima vez que lo conecte.



Connect battery to power module.

Figura 93 – Conectamos la Batería LiPo al Módulo de Alimentación

- 3- Con la palanca del acelerador del transmisor aún alta, desconectamos y volvemos a conectar la batería.



Connect battery to power module.

Figura 94 – Desconexión y Conexión de la Batería LiPo, Acelerador al máximo

- 4- El piloto automático entrará ahora en modo de calibración ESC. (En un APM, se puede notar que los LED rojos y azules parpadean alternativamente como un automóvil de policía).
- 5- Esperamos a que los ESC emitan tonos musicales, el número regular de pitidos indica el recuento de celdas de la batería (4 pitidos para la batería LiPo 4S) y luego dos pitidos adicionales para indicar que se ha capturado el acelerador máximo.
- 6- Tiramos de la palanca del acelerador del transmisor hasta su posición mínima (abajo).



Set throttle to minimum.



Ponemos el Acelerador al mínimo.

Figura 95 - Transmisor RC en modo calibración ESC, Acelerador al mínimo

- 7- Los ESC deben emitir un tono largo que indique que se ha capturado el acelerador mínimo y que la calibración está completa.

- 8- Si se escuchó el tono largo que indica una calibración exitosa, los ESC están “vivos” ahora y si levantamos un poco el acelerador, deberían girar los motores. También podemos probar que los motores giran subiendo un poco el acelerador y luego bajándolo nuevamente.
- 9- Finalmente, ajustamos el acelerador al mínimo y desconectamos la batería para salir del modo de calibración ESC.

El proceso de calibración ESC descripto anteriormente funciona perfectamente para el autopiloto Navio2 + Raspberry Pi y el hexacóptero DJI F550. Sin embargo, si esto no funciona, podemos intentar con la Calibración Manual ESC por ESC que implica conectar cada ESC al receptor RC mediante cables y realizar la calibración mediante el transmisor RC, tal como se explica en el manual de ArduPilot. Otra alternativa sería intentar la calibración ESC desde los ajustes de QGroundControl, más precisamente en la configuración de Alimentación (Power) que se verá más adelante.

Pruebas

Una vez que hemos calibrado los ESC, podemos probarlos conectando la batería LiPo; sin las hélices por supuesto.

- Nos aseguramos de que el Modo de Vuelo esté configurado en “Stabilize Mode” o Modo de Estabilización. Esto lo podemos configurar desde la vista principal de QGroundControl.
- Armamos el multicóptero. Esto se realiza colocando el stick izquierdo del transmisor RC en la posición inferior-derecha. Luego, los motores comenzarán a girar a baja velocidad.
- Damos una pequeña cantidad del acelerador (stick izquierdo hacia arriba). Todos los motores deben girar aproximadamente a la misma velocidad y deben arrancar al mismo tiempo. Si los motores no arrancan todos al mismo tiempo y no giran a la misma velocidad, los ESC todavía no están calibrados correctamente.
- Desarmamos el multicóptero. Esto se realiza colocando el stick izquierdo en la posición inferior-izquierda.

Solución de problemas

El modo de calibración ESC “todo a la vez” simplemente hace que el autopiloto pase la señal del acelerador del transmisor RC directamente hacia los ESC. Si se enciende el piloto automático mientras está en este modo, enviará la misma señal PWM a todos los ESC. Eso es todo lo que hace. Muchos ESC usan el acelerador completo en el inicio para ingresar al modo de programación, la posición del acelerador completo se guarda como el punto final superior y cuando baja el acelerador a cero, esa posición se guarda como el punto final inferior.

Si después de la calibración los motores NO giran a la misma velocidad ni arrancan al mismo tiempo, debemos repetir el proceso de calibración. Si se probó la calibración automática anterior y no funcionó o los ESC no manejan los motores de manera idéntica, podemos probar con el método de calibración manual ESC por ESC descrito en la documentación de ArduPilot. Eso debería funcionar casi siempre (rara vez después de una calibración manual completa, tendremos que hacer una calibración automática “todo a la vez” adicional).

Finalmente, hay una gran cantidad de marcas y tipos de ESC disponibles y algunos de ellos no se adhieren a las convenciones de programación normales y es posible que simplemente no funcionen con el APM de la manera correcta.

➤ 4.2.7 Sensores

La sección Configuración de Sensores nos permite configurar y calibrar la brújula, el giroscopio, el acelerómetro y cualquier otro sensor del vehículo (los sensores disponibles dependen del firmware del autopiloto y del tipo de vehículo).

Los sensores disponibles se muestran como una lista de botones junto a la barra lateral. Los sensores marcados en verde ya están calibrados, mientras que los sensores marcados en rojo requieren calibración antes del vuelo. Los sensores sin luz son configuraciones simples con valores predeterminados que podemos elegir no calibrar.

Debemos hacer click en el botón de cada sensor para iniciar su secuencia de calibración.

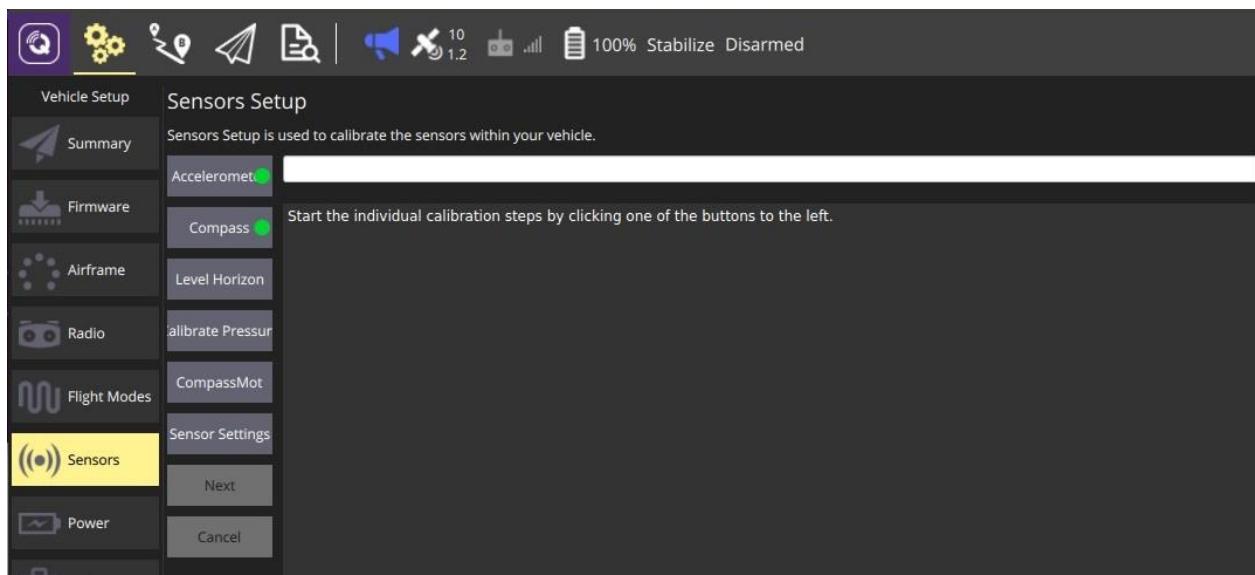


Figura 96 – Configuración de Sensores

- Acelerómetro

Para calibrar los acelerómetros de la controladora de vuelo, el programa pedirá que coloque y sostenga el vehículo en una serie de orientaciones (indicará gráficamente cuándo moverse entre posiciones). A medida que avancemos en la calibración, se irá cargando una barra de progreso de color verde y cuando se llene completamente habrá finalizado la calibración.

- Brújula

Ardupilot utiliza soporte de calibración a bordo que permite una calibración más precisa. En este caso, se debe girar el vehículo al azar alrededor de todos los ejes hasta que la barra de progreso (color verde) se llene hasta la derecha y se complete la calibración. Una vez finalizada la calibración, se obtendrán los resultados.

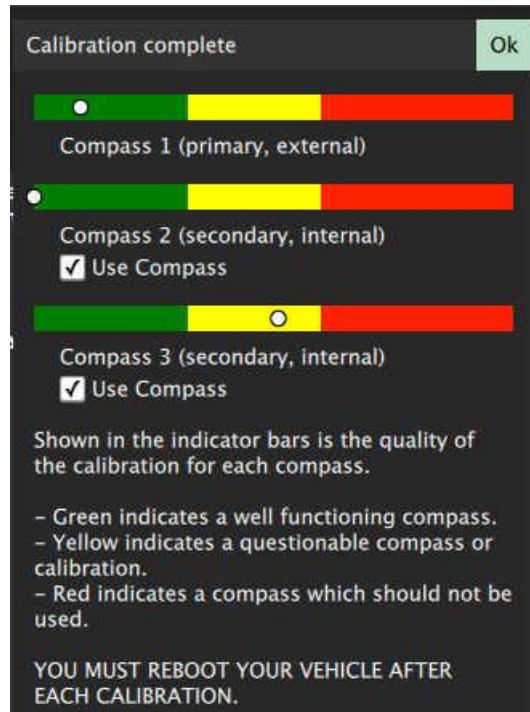


Figura 97 – Resultados Calibración Brújula

Esto nos muestra la calidad de la calibración para cada brújula. Con estos valores, podemos determinar si queremos desactivar el uso de brújulas de bajo rendimiento.

- Horizonte de Niveles

Si el horizonte no está nivelado después de completar la calibración del acelerómetro, se puede calibrar el horizonte de nivel para el vehículo. Para ello, el programa nos pedirá que coloquemos el vehículo en una orientación nivelada mientras captura la información.

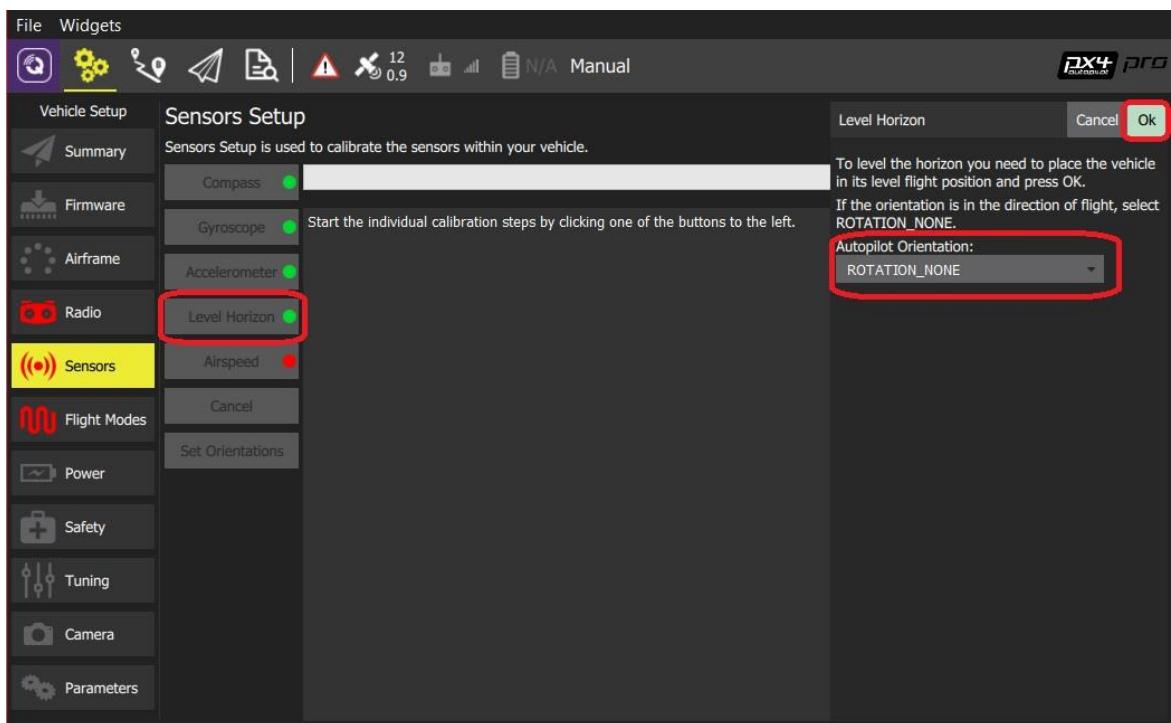


Figura 98 – Calibración Nivel Horizontal

- Presión/Barómetro

Este conjunto de calibración es la altitud a cero a la presión actual. Para realizar la calibración, es necesario colocar el vehículo al nivel del suelo y hacer click en el botón “Calibrate Pressure”, luego el resultado de la calibración se muestra inmediatamente.

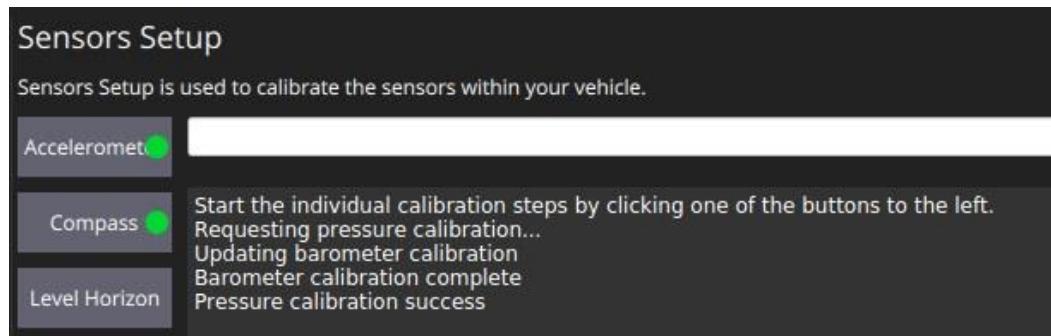


Figura 99 – Resultado Calibración Presión/Barómetro

Hasta aquí hemos explicado la calibración obligatoria, el resto de los sensores pueden calibrarse de forma opcional o simplemente dejarse con los valores por defecto. En nuestro caso, utilizamos los valores predeterminados para el resto de los sensores.

➤ 4.2.8 Flight Modes (Modos de Vuelo)

La sección Modos de Vuelo nos permite asignar distintos tipos de modos de vuelo a los canales de radio y, por lo tanto, a los interruptores (de 3 posiciones) del control remoto del sistema RC.

Los modos de vuelo proporcionan diferentes niveles de vuelo asistido por piloto automático y vuelo totalmente autónomo a través de misiones. Los diferentes modos de vuelo permiten a los usuarios principiantes aprender a volar con una plataforma más indulgente que la proporcionada por el control RC básico únicamente. También, permiten la automatización de tareas comunes como despegar, aterrizar y volver a la posición de lanzamiento original.

En nuestro caso, dejaremos los parámetros por defecto dado que los modos de vuelo también pueden configurarse en tiempo real desde la aplicación QGroundControl. No obstante, todas las pruebas de vuelo las realizaremos en el modo de vuelo “Stabilize”, dado que así lo recomienda el manual de Ardupilot.

➤ 4.2.9 Power (Alimentación)

La pantalla Power Setup se utiliza para configurar los parámetros de la batería y también proporcionar ajustes avanzados para las hélices. La configuración requiere cargar parámetros tales como número de celdas, voltaje máximo por celda, voltaje medio por celda y mediciones de voltaje y corriente que proporciona la batería.

Por el momento dejaremos estos parámetros por defecto a fin de obtener una estimación del porcentaje de batería en tiempo real. En caso de requerir una medición más precisa de los parámetros eléctricos de la batería, es necesario realizar una calibración de los valores de voltaje y corriente de la batería tal como se explica en el manual de QGroundControl.

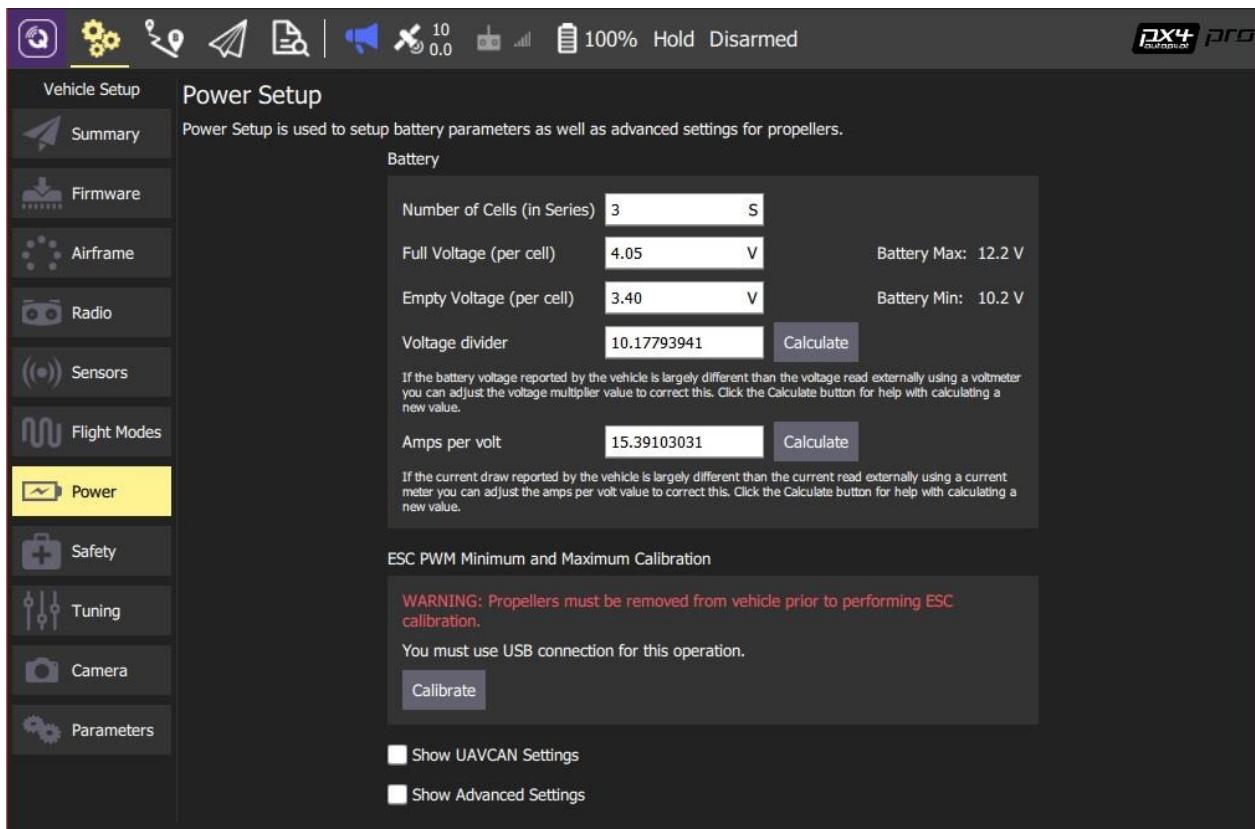


Figura 100 – Configuración de Batería

Calibración mínima y máxima de ESC PWM

En el apartado anterior ya explicamos como realizar la calibración de los ESC, sin embargo, QGroundControl también permite realizar la calibración de los valores PWM mínimos y máximos.

Para calibrar los valores de ESC PWM máx/mín:

- 1- Retiramos las hélices.
- 2- Conectamos la Controladora de Vuelo a QGC a través de USB (solamente).
- 3- Hacemos click en el botón **Calibrar**.

También es posible realizar una Configuración Avanzada de energía que contempla la caída de voltaje a plena carga y la configuración del bus UAVCAN. Sin embargo, estos ajustes están destinados a usuarios más experimentados.

➤ 4.2.10 Motors (Motores)

La configuración Motors se utiliza para probar los motores/servos individuales (por ejemplo, para verificar que los motores giren en la dirección correcta).

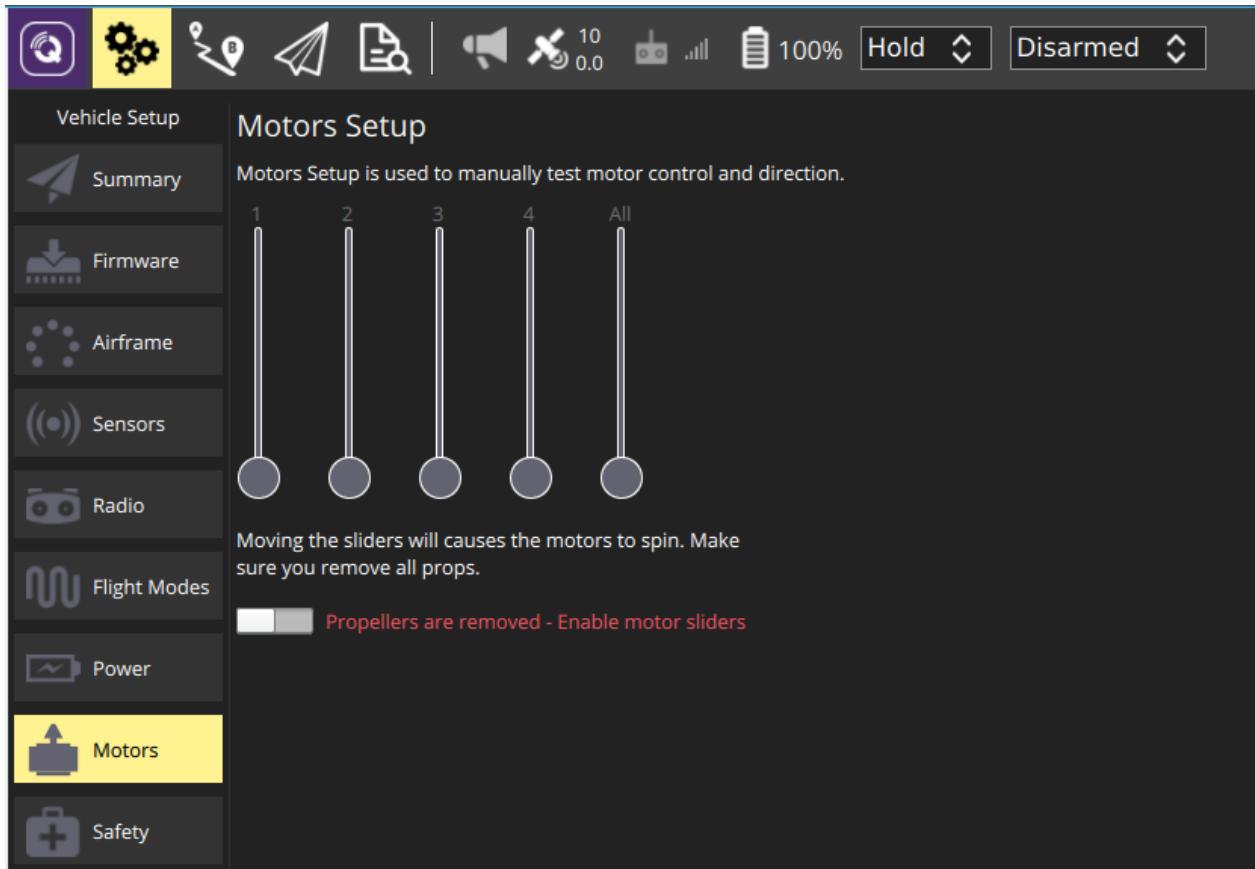


Figura 101 – Configuración de Motores

Para probar los motores, realizamos lo siguiente:

- 1- Retiramos las hélices.
- 2- Deslizamos el interruptor para habilitar los controles deslizantes del motor (“Propellers are removed – Enable motor slider”).
- 3- Ajustamos los controles deslizantes individuales para hacer girar los motores y verificar que giran en la dirección correcta.

NOTA: Los motores solo giran después de soltar el control deslizante y dejarán de girar automáticamente después de 3 segundos.

➤ 4.2.11 Safety, Tuning, Camera y Parameters

En estos apartados no realizaremos ninguna configuración dado que no es estrictamente necesario para realizar un vuelo, por lo tanto, utilizaremos las configuraciones predeterminadas.

5.0 PRUEBAS DE VUELO

En el apartado anterior se explicó el uso de software para realizar la calibración del multicóptero y las configuraciones necesarias para poder realizar el primer vuelo. Ahora nos centraremos en la recopilación de datos o parámetros de vuelo del dron a medida que describe una trayectoria. Sin embargo, comenzaremos con una introducción acerca de las comprobaciones previas y de los controles de transmisor RC para poder realizar el primer vuelo.

5.1 Comprobaciones previas

Antes de colocar las hélices y realizar alguna operación, debemos realizar ciertas comprobaciones por la seguridad del usuario y del dron.

- **Sistema eléctrico:** todo el cableado ha de estar bien organizado y sujeto, que facilite posteriores revisiones del dron y descarte el riesgo de daño al engancharse con alguna de las hélices. Las soldaduras deben ser revisadas, puesto que el hecho de que un solo filamento conecte con el cable opuesto provocará problemas con los motores y que o bien no vuela o se caiga durante el vuelo.
- **Atornillado y fijaciones:** debemos asegurarnos de que los componentes se encuentren fijos, todos los tornillos colocados y apretados correctamente.
- **Alimentación de motores:** cuando energizamos el dron, podremos escuchar un sonido intermitente a la par que se mueven ligeramente los motores, puesto que es una comprobación de estos. Si se observa que todos se mueven, los seis motores “suenan” (es un sonido intermitente por motor) y se apagan a la vez, es señal de que los seis motores están correctamente alimentados. Si alguno no suena o no se mueve o tarda más que los demás en apagar su sonido de comprobación, se recomienda revisar el sistema eléctrico y las soldaduras.
- **Giro de los motores:** es de vital importancia la revisión del sentido de giro de los motores, puesto que un solo motor girando en sentido contrario puede suponer una inversión de la nave en pleno vuelo y, por tanto, un impulso directo hacia el suelo. En la siguiente imagen extraída de la página oficial de DJI, el modelo 4 muestra el sentido de giro que debe presentar cada motor. Recordamos que los brazos rojos indican el frente o nariz del dron.

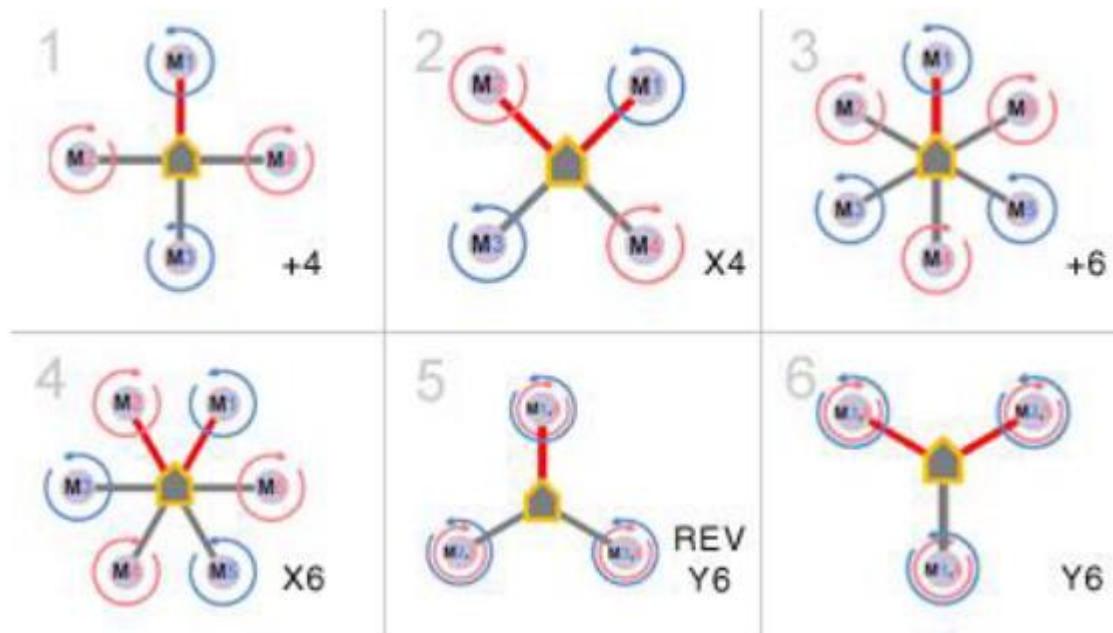


Figura 102 – Definición del sentido de giro de los motores

Para comprobar el sentido de giro, se recomienda colocar algún tipo de papel doblado de forma que encaje con el motor y gire con él (pero que no lo atasque); de esta forma, cuando

desaceleraremos, observaremos el giro del papel y en definitiva el del motor. Esta comprobación la podemos realizar utilizando las palancas del transmisor RC o mejor aun utilizando el software QGroundControl, dado que en el apartado de configuraciones de los motores podemos hacer girar cada uno individualmente y también regular la aceleración.

En caso de que uno de los motores no funcione en el sentido adecuado, tan solo debemos cambiar dos de los tres conectores que unen el variador (ESC) con el motor. Debido a que los motores son trifásicos, al cambiar dos cables provocará un desfase de voltajes que provoca la inversión del sentido de giro.

5.2 Controles de vuelo

Como describimos anteriormente, el control remoto o transmisor RC es el dispositivo que permite pilotar un dron y controlar su patrón de vuelo. Cuando realizamos un movimiento en el mando, éste envía una señal de radio al multicóptero con las órdenes que tiene que seguir.

El control remoto es distinto en cada dron y tienen diferentes formas, tamaños y características. Pero hay ciertas partes que son universales en todos los transmisores.

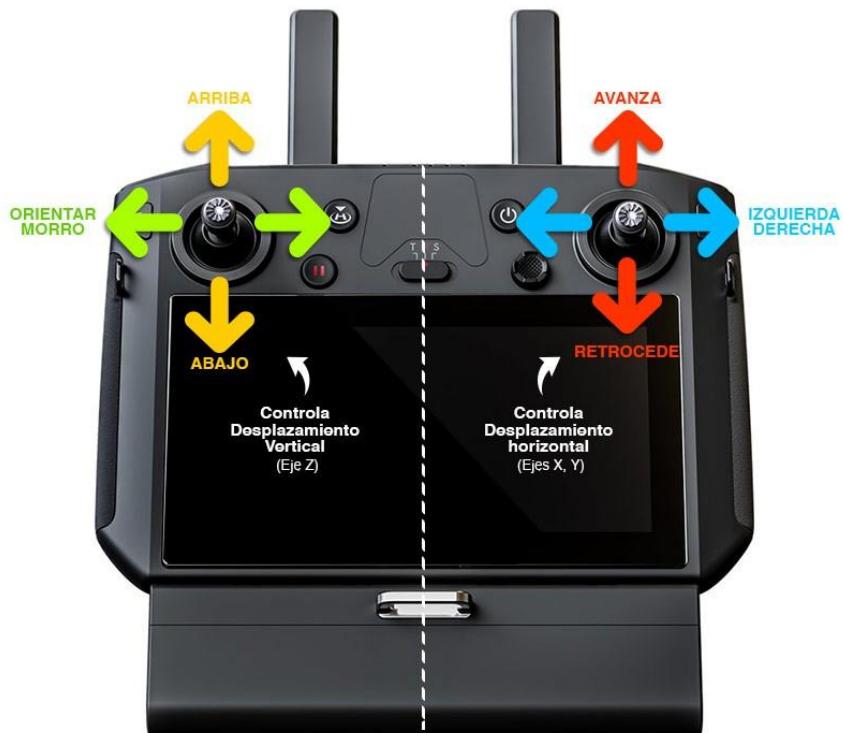


Figura 103 – Controles de Vuelo

Los controles de vuelo son las dos palancas (joysticks, sticks, etc.) frontales que hay en todos los mandos de un dron. Todos los transmisores RC son muy similares, variando principalmente la cantidad y posición de los botones y palancas auxiliares; sin embargo, su esencia radica en esas dos palancas que mencionamos.

El control remoto puede configurarse de dos diferentes modos de uso, o lo que es lo mismo, con qué mano (derecha o izquierda) se controlan los diferentes movimientos de la aeronave en el aire. En nuestro caso, utilizaremos el **Modo 2**, que se utiliza en Europa.

Palanca Izquierda: “Desplazamiento Vertical y Guiñada (eje Z)”.

El stick izquierdo controla dos movimientos diferentes, el acelerador (throttle) y la guiñada (yaw). Permite ajustar la altura de vuelo y gira el dron en sentido horario o antihorario.

- Desplazamiento y velocidad vertical: la altura de vuelo y su velocidad vertical se controla mediante el control **throttle (acelerador)**, moviendo la palanca izquierda hacia arriba o hacia abajo.
- Control de guiñada: la orientación (nariz, morro, etc) del dron se controla mediante el control **yaw (guiñada)**, es decir moviendo la palanca izquierda hacia la derecha o hacia la izquierda.

Palanca Derecha: “Avance y Retroceso (eje X) – Derecha e Izquierda (eje Y)”.

El stick derecho controla los movimientos horizontales del dron, el alabeo/balanceo (roll) y el cabeceo (pitch). En otras palabras, mueve el dron hacia la izquierda/derecha y hacia atrás/adelante.

- Avance y retroceso: el movimiento hacia adelante o marcha atrás y su velocidad de desplazamiento, se logra mediante el control **pitch (cabeceo)**. Esto es moviendo la palanca derecha hacia arriba o hacia abajo.
- Desplazamiento lateral: el movimiento hacia la derecha o hacia la izquierda y su velocidad de desplazamiento se logra mediante el control **roll (balanceo)**. Esto es moviendo la palanca derecha lateralmente, es decir hacia la derecha o hacia la izquierda.

Sólo con las dos palancas o joysticks se puede controlar el alabeo (o balanceo), cabeceo, guiñada (es decir, los tres ejes de movimiento de la aeronave) y la aceleración. En la siguiente imagen se puede comprender más fácilmente qué es el alabeo (roll en inglés), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw).

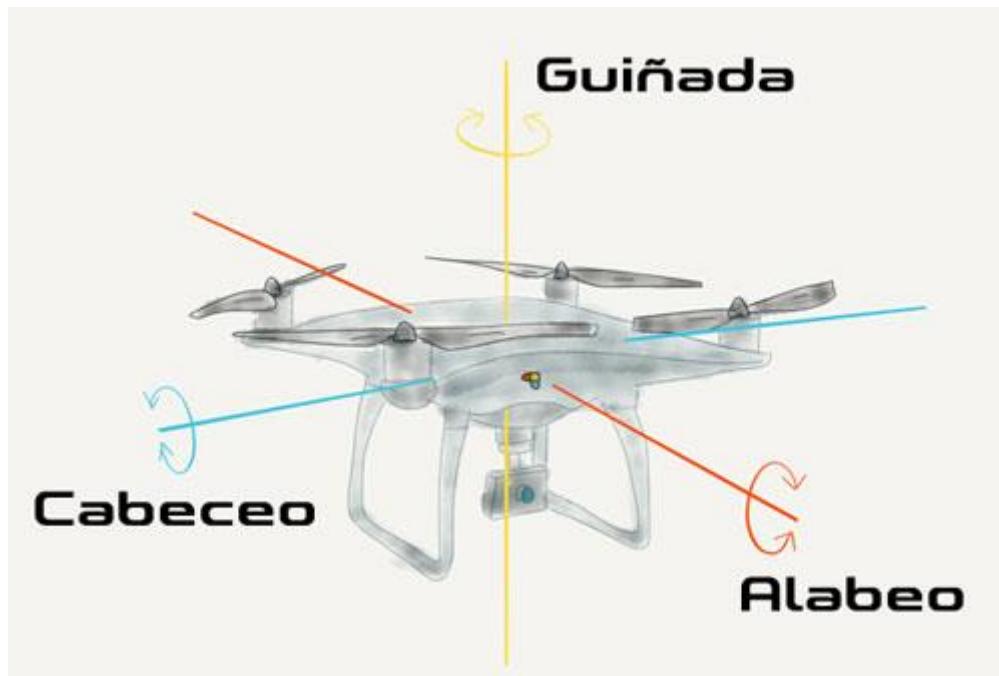


Figura 104 – Ejes de movimiento de un dron

A continuación, se emplea una aeronave de ala fija para comprender a qué eje de movimiento se refiere cada término.

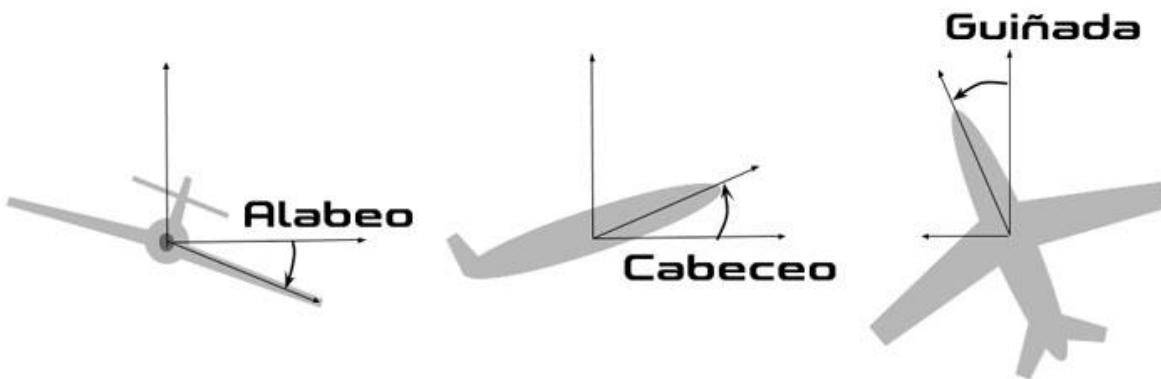


Figura 105 – Ejes de movimiento de una aeronave común

De todas formas, vamos a explicar con más detenimiento qué es el alabeo, cabeceo, guiñada y aceleración dentro de los controles de un dron. Para ello utilizaremos como ejemplo un mando de radiocontrol de tipo profesional como los de Futaba, donde solo nos centraremos en las dos palancas o joysticks.



1. Joysticks

2. Botones de trimado

3. Botones de canales auxiliares

Figura 106 – Principales controles de un mando de radiocontrol

- **Alabeo (Roll)**

Alabeo (roll en inglés) se refiere al movimiento del dron hacia la izquierda o la derecha.

Considerando la configuración de los joysticks que hemos comentado unos párrafos más arriba, el alabeo sucede cuando se mueve la palanca derecha del mando bien hacia la izquierda o hacia la derecha.



Figura 107 – Alabeo en un drone

Entonces, si empujamos la palanca derecha hacia la derecha, el multicóptero se inclinará diagonalmente en dicha dirección. De esta manera las hélices empujan el aire de derecha a izquierda, lo que impulsa al dron hacia la derecha. Lo mismo sucederá si se inclina la palanca del mando hacia la izquierda, salvo porque en este caso las hélices empujarían el aire de izquierda a derecha, impulsando al dron hacia la izquierda.

Por último, cabe destacar que a la palanca derecha a veces se le llama con el término inglés “aileron”, si bien únicamente para ejercer las funciones de control del alabeo.

▪ **Cabeceo (Pitch)**

Cabeceo (pitch in inglés) hace referencia a la inclinación de la aeronave hacia arriba o hacia abajo, tomando la parte frontal de la misma como referencia. Esto permite controlar que el dron se mueva hacia adelante o hacia atrás.

La palanca derecha del mando del dron también sirve para regular el cabeceo de la aeronave, si bien en este caso moviendo la palanca hacia arriba o hacia abajo, y no hacia los lados (en cuyo caso se estaría controlando el alabeo).



Figura 108 – Cabeceo en un drone

A la palanca del mando del radiocontrol responsable de controlar el cabeceo del dron, se le conoce con el término inglés “elevator”. Solamente hace referencia a los movimientos hacia arriba y hacia abajo de la palanca; los movimientos a derecha e izquierda de la palanca están dentro del término “aileron”, propio del alabeo.

- **Guiñada (Yaw)**

La guiñada (yaw en inglés) es el movimiento de la aeronave en el sentido de las agujas del reloj (o en sentido inverso). Es especialmente útil para quienes toman fotografías y realizan videos con drones, pues este tipo de movimiento hace posible realizar las tomas “orbitando” alrededor del objetivo.

Guiñada:
Vista superior
del dron



Figura 109 – Guiñada en un dron

La guiñada se controla con la palanca izquierda del mando del radiocontrol, moviéndola a derecha o izquierda dependiendo del sentido que se le quiera dar al movimiento de la aeronave.

El movimiento a derecha e izquierda de esta palanca, correspondiente a la guiñada, también se le conoce con el término inglés de “rudder”.

- **Aceleración (Throttle)**

La aceleración (throttle en inglés) o potencia dada a los motores se regula mediante la palanca izquierda del mando, moviéndola hacia arriba y hacia abajo.

Aceleración:
Vista lateral
del dron



Figura 110 – Aceleración en un drone

De esta manera, para mantener al dron en vuelo con la suficiente potencia, es necesario mantener la palanca izquierda subida lo suficiente y de manera constante durante todo el vuelo. Lógicamente, si se quiere regular la altitud de forma manual con la emisora, habrá que aumentar o disminuir la potencia de aceleración transmitida a los motores del dron.

A la hora de aterrizar, no se recomienda soltar la palanca de aceleración hasta que el dron no esté, al menos, a apenas unos centímetros del suelo. De lo contrario se corre el riesgo de que se quiebre alguna pieza.

Armar los motores

Cuando conectamos la batería al dron los motores no giran todavía, es necesario armar el dron. Armar el vehículo permite que los motores comiencen a girar. Antes de armar, debemos asegurarnos de que todas las personas, objetos y cualquier parte del cuerpo estén libres de las hélices. A continuación, realizamos lo siguiente:

- 1- Encendemos el transmisor RC.
- 2- Enchufamos la batería LiPo. Las luces rojas y azules (led RGB controladora de vuelo) deben parpadear durante unos segundos mientras los giroscopios se calibran (no debemos mover el dron).
- 3- Se ejecutarán las comprobaciones previas al armado del dron y, si se encuentra algún problema, el led RGB parpadeará en amarillo y la falla se mostrará en la pantalla de QGroundControl.
- 4- Verificamos que el modo de vuelo esté en Stabilize, ACRO, AltHold, Loiter o PosHold.
- 5- Armamos los motores colocando la palanca izquierda del transmisor RC en la posición *inferior-derecha* durante 5 segundos. No debemos mantener el stick en dicha posición durante demasiado tiempo (> 5 segundos) o comenzará la función AutoTrim (Recorte Automático).



Figura 111 – Armado de motores

- 6- Una vez armado, los leds se volverán sólidos y las hélices comenzarán a girar. La pantalla de QGroundControl mostrará el cartel “Armed”.
- 7- Levantamos el acelerador (stick izquierdo hacia arriba) lentamente para despegar.

Desarmar los motores

Cuando ya no vamos a realizar vuelos, debemos detener los motores para poder desconectar la batería de alimentación. Desarmar los motores hará que estos dejen de girar. Para desarmar los motores, debemos hacer lo siguiente:

- 1- Verificamos que el modo de vuelo esté configurado en Stabilize, ACRO, AltHold, Loiter o PosHold.
- 2- Colocamos la palanca izquierda del transmisor RC en la posición *inferior-izquierda* y la mantenemos en esa posición por 2 segundos.



Figura 112 – Desarmado de motores

- 3- El led comenzará a parpadear indicando que el vehículo está desarmado. En la pantalla de QGroundControl aparecerá el cartel “Disarmed”.
- 4- Desconectamos la batería LiPo.
- 5- Apagamos el Transmisor RC.

5.3 Modos de vuelo

ArduCopter tiene 25 modos de vuelo incorporados, 10 de los cuales se utilizan regularmente. Hay modos para admitir diferentes niveles/tipos de estabilización de vuelo, un piloto automático sofisticado, un sistema de seguimiento, etc.

Los modos de vuelo se controlan a través de la radio (mediante un interruptor del transmisor RC que debemos configurar), a través de comandos de misión o utilizando comandos de una estación terrestre (GCS) desde una computadora.

La siguiente tabla muestra para cada modo de vuelo, si proporciona control de altitud o posición y si requiere información de posición válida de un sensor (generalmente GPS) para armarse o cambiar a este modo.

Modo	Alt Ctrl	Pos Ctrl	Pos Sensor	Descripción
Acro	-	-		Mantiene la actitud, no el autonivel.
Airmode	-	-/+		En realidad, no es un modo sino una característica.
Alt Hold	s	+		Mantiene la altitud y el autonivel, el alabeo y el cabeceo.
Auto	A	A	Y	Ejecuta una misión predefinida.
Auto Tune	s	A	Y	Procedimiento automatizado de cabeceo y alabeo para mejorar los lazos de control
Brake	A	A	Y	Lleva al multicóptero a una parada inmediata.
Circle	s	A	Y	Rodea automáticamente un punto delante del vehículo.
Drift	-	+	Y	Como Stabilize, pero coordina la giñada con el alabeo como un avión.
Flip	A	A		Se eleva y completa un giro automatizado.
FlowHold	s	A		Control de posición mediante flujo óptico.
Follow	s	A	Y	Sigue a otro vehículo.
Guided	A	A	Y	Navega a puntos únicos comandados por GCS.
Heli_Autorotate	A	A	Y	Utilizado para emergencias en helicópteros tradicionales. Sólo helicóptero. Actualmente sólo SITL.
Land	A	s	(Y)	Reduce la altitud al nivel del suelo, intenta ir directamente hacia abajo.
Loiter	s	s	Y	Mantiene la altitud y la posición, utiliza GPS para los movimientos.
PosHold	s	+	Y	Como el Loiter, pero el alabeo y el cabeceo son manuales cuando las palancas (sticks) no están centradas.
RTL	A	A	Y	Retorna por encima del lugar de despegue, también puede incluir aterrizaje.
Simple/Super Simple			Y	Un complemento a los modos de vuelo para usar la vista del piloto en lugar de la orientación de giñada.
SmartRTL	A	A	Y	RTL pero traza el camino para llegar a casa.
Sport	s	s		Alt-Hold, pero mantiene el cabeceo y el alabeo cuando las palancas (sticks) están centradas.
Stabilize	-	+		Autonivela el eje de alabeo y cabeceo.
SysID	-	+		Modo especial de diagnóstico/modelado.
Throw	A	A	Y	Mantiene la posición después de un despegue con lanzamiento.
Turtle	-	-		Permite invertir y hacer girar pares de motores adyacentes para volver a poner en posición vertical un vehículo invertido o chocado.
ZigZag	A	A	Y	Útil para la fumigación de cultivos.

Referencias

Símbolo	Definición
-	Control manual
+	Control manual con límites y autonivel
s	El piloto controla la velocidad de ascenso
A	Control automático

Modos de vuelo recomendados

En general, cuando comenzamos a usar ArduCopter por primera vez, debemos progresar a través de los modos de vuelo en el orden que se enumera a continuación, asegurándonos de sentirnos cómodos con cada uno antes de progresar al siguiente.

- *Stabilize (Estabilizado)*

El modo estabilizado nos permite volar el vehículo manualmente, pero autonivela el eje de alabeo y cabeceo.

La entrada de alabeo y cabeceo del piloto controla el ángulo de inclinación del multicóptero.

Cuando el piloto suelta la palanca del alabeo y cabeceo, el vehículo se nivela automáticamente.

La entrada de guiñada del piloto controla la velocidad de cambio del rumbo (o nariz). Cuando el piloto suelta la palanca de guiñada, el vehículo mantendrá su rumbo actual.

La entrada del acelerador del piloto controla la velocidad media del motor, lo que significa que se requiere un ajuste constante del acelerador para mantener la altitud. Si el piloto baja el acelerador por completo los motores irán a su velocidad mínima y si el vehículo está volando perderá el control de actitud y caerá.

- *Alt Hold (Retención de Altitud)*

En el modo de retención de altitud, ArduCopter mantiene una altitud constante al tiempo que permite que el alabeo, el cabeceo y la guiñada se controlen normalmente.

Cuando se selecciona el modo Alt Hold, el acelerador se controla automáticamente para mantener la altitud actual. El alabeo, el cabeceo y la guiñada funcionan igual que en el modo Stabilize, lo que significa que el piloto controla directamente los ángulos de inclinación del alabeo y el cabeceo, y el rumbo.

Cuando la palanca del acelerador está en el medio (40% - 60%), el vehículo mantendrá la altitud actual. Fuera de la zona muerta del acelerador (es decir, por debajo del 40% o por encima del 60%), el vehículo descenderá o subirá dependiendo de la desviación de la palanca.

- *Loiter (Merodeador)*

El modo merodeador intenta automáticamente mantener la ubicación, el rumbo y la altitud actuales. El piloto puede volar el multicóptero en modo Loiter como si estuviera en un modo más manual, pero cuando se sueltan las palancas, el vehículo disminuirá la velocidad hasta detenerse y mantenerse en posición.

Un buen bloqueo GPS, una baja interferencia magnética en la brújula y bajas vibraciones son importantes para lograr un buen rendimiento del merodeador.

La ubicación horizontal se puede ajustar con la palanca de control de alabeo y cabeceo.

Cuando el piloto suelta los sticks, el multicóptero se detendrá lentamente.

La altitud se puede controlar con la palanca del acelerador al igual que en el modo Alt Hold.

El rumbo (o nariz) se puede ajustar con la palanca de control de guñada.

El vehículo se puede armar en modo Loiter, pero sólo una vez que el GPS tenga bloqueo 3D y el HDOP haya caído por debajo de 2.0.

- **RTL (Return to Launch)**

El modo RTL (Retorno al Lanzamiento) hace que el multicóptero se desplace desde su posición actual para ubicarse por encima de la posición de inicio. El comportamiento del modo RTL se puede controlar mediante varios parámetros ajustables.

Cuando se selecciona el modo RTL, el multicóptero volverá a la ubicación de inicio. Primero se elevará a RTL_ALT antes de regresar a casa o mantendrá la altitud actual si la altura es superior a RTL_ALT. El valor predeterminado para RTL_ALT es 15 [m].

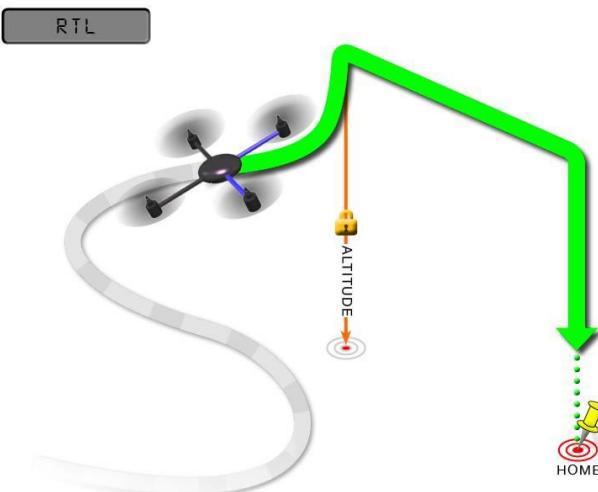


Figura 113 – Modo RTL

El modo RTL requiere una estimación de posición confiable para funcionar correctamente, más comúnmente proporcionada por el GPS y la brújula.

- **Auto (Automático)**

En el modo automático, el multicóptero seguirá un script de misión preprogramado almacenado en el piloto automático que se compone de comandos de navegación (es decir, puntos de referencia) y comandos “do” (es decir, comandos que no afectan la ubicación del multicóptero, incluido el disparo de un obturador de cámara).

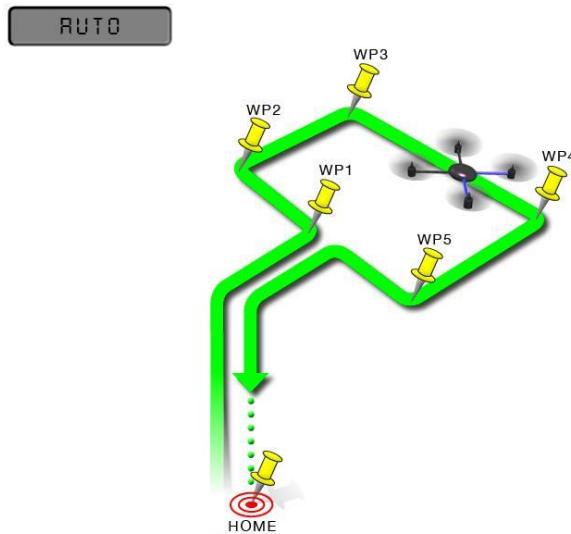


Figura 114 – Modo Auto

El modo AUTO incorpora el control de altitud del modo Alt Hold y el control de posición del modo Loiter y no debe intentarse antes de que estos modos estén volando bien. Se aplican los mismos requisitos, incluida la garantía de que los niveles de vibración y los niveles de interferencia de la brújula sean aceptables y que el GPS funcione bien, incluido el retorno de un HDOP inferior a 2.0.

5.4 Prueba de vuelo

Una vez realizada la introducción a los modos de vuelo, es momento de iniciar el primer vuelo. En nuestro caso, las pruebas de vuelo se realizaron dentro del predio de la Universidad “UTN Facultad Regional Mendoza”, más precisamente en la cancha de fútbol dado que era el único lugar con suficiente espacio y libre de obstáculos.

Tal como se explicó anteriormente, lo primero que hicimos fue encender el dron (conectamos la batería) y el transmisor RC, luego iniciamos QGroundControl en la notebook para supervisar el vuelo. Teniendo en cuenta que iba a ser el primer vuelo, decidimos hacer una nueva calibración de los todos los sensores dado que todas las configuraciones fueron realizadas dentro del laboratorio de la universidad. Acto seguido, reiniciamos el dron y pasamos a visualizar la pantalla del QGroundControl para verificar que todo esté en orden, es decir, que haya buena recepción de señal GPS, RC, etc. Debemos tener en cuenta que, si todo está listo para volar, la pantalla de la estación terrestre (notebook) mostrará un cartel de color verde con el mensaje “Ready to Fly” indicando que podemos armar el vehículo para iniciar el despegue.

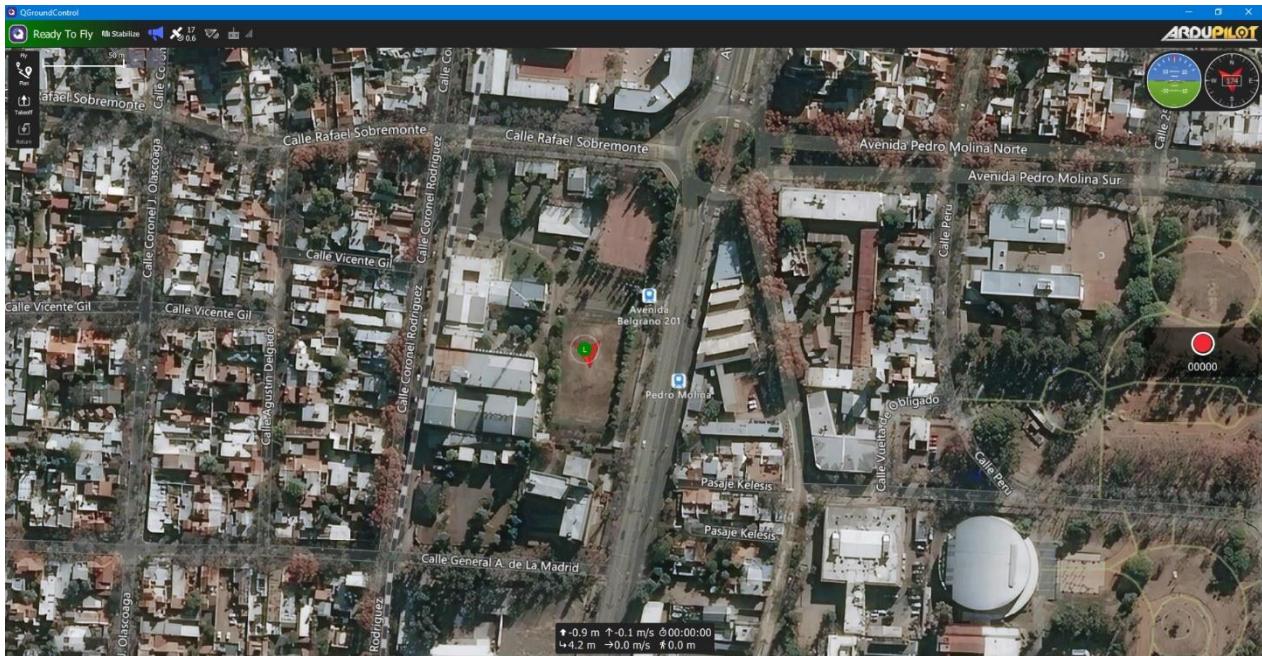


Figura 115 – Pantalla QGroundControl “Ready To Fly”

De la figura anterior, vemos que la aplicación indica “Ready To Fly” y esto nos garantiza que todos los parámetros de vuelo están en orden y podemos iniciar el armado de los motores. A su vez, podemos verificar la ubicación y la orientación del dron mediante la flecha de color rojo que se muestra en la parte central del mapa; en este caso, la flecha siempre apunta hacia la nariz de la aeronave.

Ahora, el siguiente paso es armar los motores colocando el stick izquierdo del transmisor RC en la posición inferior-derecha. Esto hará que los motores empiecen a girar y se acelerarán suavemente mediante la palanca izquierda, mientras que con la derecha se controlará la inclinación de la aeronave.



Figura 116 – Pruebas de vuelo

Una vez que los motores comienzan a girar, la estación terrestre nos irá mostrando la posición del vehículo en tiempo real como así también la orientación, la altura de vuelo, los satélites GPS visibles, etc.

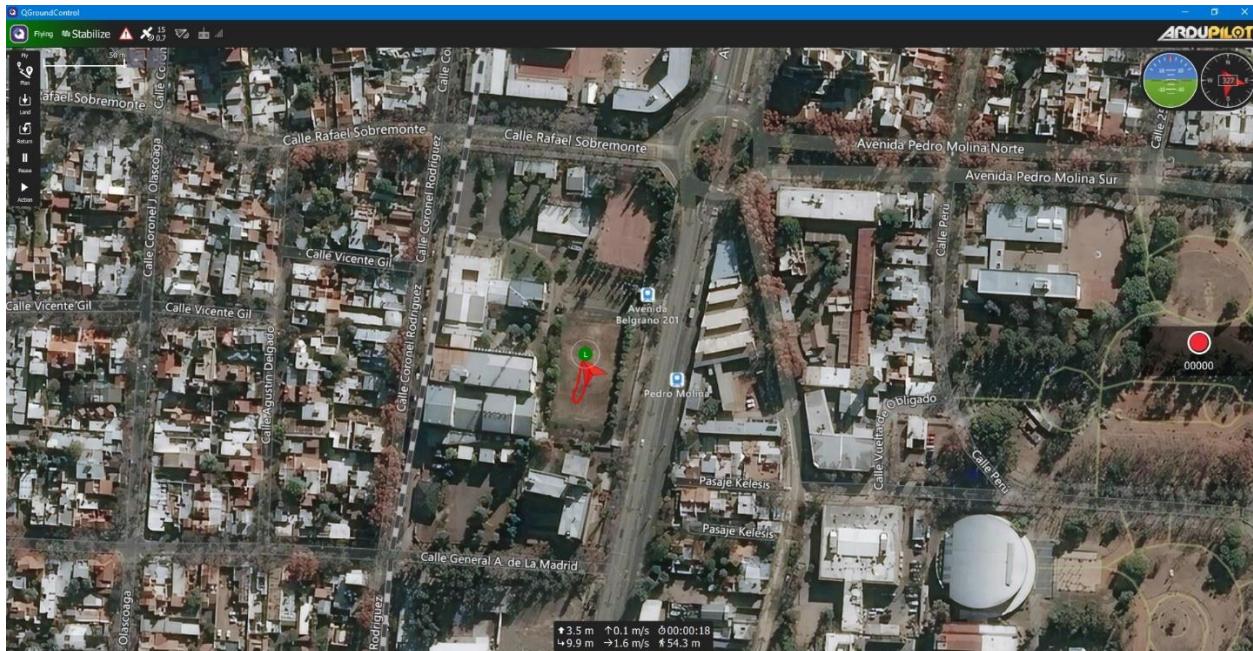


Figura 117 – Supervisión del vuelo en tiempo real

Como se ve en la figura anterior, QGroundControl nos indica que el vehículo está volando mediante el mensaje “Flying” en la parte superior izquierda (fondo verde) y nos indica el modo de vuelo. En este caso, el modo de vuelo es “Stabilize” o Estabilizado, es decir, que el dron autonivelá su inclinación y es el modo de vuelo recomendado por Ardupilot.

5.5 Registro de vuelo

En la jerga de los drones existe algo conocido como “caja negra” que puede pensarse como una grabadora digital que guarda en memoria los registros de cada uno de los vuelos que realiza nuestro vehículo. Esta caja negra va generando un backup con los datos de telemetría del vuelo. Esta información se guarda en un sistema de archivos “Flight Record” al cual comúnmente se lo denomina **registro de vuelo** o simplemente “*log de vuelo*” y es fundamental cuando necesitamos saber qué ocurrió en nuestro dron mientras estaba volando.

Como sabemos, todos los datos de telemetría son recibidos por la Estación Terrestre en tiempo real para mostrarnos por pantalla ciertos parámetros de vuelo como la altura, la distancia, posicionamiento, satélites, brújula, potencia de la señal RC, etc. En fin, todo lo que vemos en la pantalla de la Estación Terrestre es lo que el dron está enviando para saber qué sucede, pero además envía muchos más datos que no son visibles al usuario. De esta forma, todo lo que va sucediendo durante el vuelo queda registrado como backup, tanto en el propio dron como en un archivo de respaldo alojado en la aplicación que usamos como Estación Terrestre.

¿Para qué sirven los datos del LOG?

Los datos que almacena el Registro de vuelo o LOG nos permiten realizar una depuración del vuelo y determinar ciertos aspectos tales como:

- ✓ Fallas mecánicas: incluyen fallas del motor o ESC, rotura o desprendimiento de una hélice, etc.

- ✓ Vibraciones: las altas vibraciones pueden hacer que las estimaciones de altitud y posición horizontal basadas en el acelerómetro del vehículo se alejen de la realidad.
- ✓ Falla de instrumentos de navegación (brújula) o posicionamiento (GPS).
- ✓ Fallas de comunicación de radio (RC).
- ✓ Detectar advertencias que arrojó el dron durante el vuelo y no pudimos comprender.
- ✓ Ver eficiencia, estado de celdas, porcentaje de carga de la batería, etc.
- ✓ Detectar la ubicación del dron perdido y las posibles causas de su caída.

Tipos de registros

Hay dos formas de registrar los datos de nuestro vuelo. Con algunas excepciones, los dos métodos que se listan a continuación registran datos muy similares, pero de diferentes maneras:

- **Registros de dataflash (“.bin” y “.log”):** se registran en el piloto automático (a menudo en la tarjeta SD), por lo que deben descargarse del piloto automático después del vuelo. De forma predeterminada, se crean después de armar el vehículo por primera vez. Dependiendo del tipo y la configuración del piloto automático, los registros de dataflash pueden guardarse en una tarjeta SD, chip dataflash o transmitirse a través de puertos de telemetría MAVLink.
- **Registros de telemetría (“.tlog”):** también conocidos como “tlogs”, son registrados por la Estación Terrestre (es decir, QGroundControl, Mission Planner, etc.) en la PC local cuando el piloto automático está conectado a través de un enlace de telemetría. Los tlogs son grabaciones de los mensajes de telemetría MAVLink enviados entre el piloto automático y la Estación Terrestre y se crean automáticamente en el momento en que se realiza la conexión del autopiloto con el software GCS (Ground Control Station).

5.6 Datos de vuelo

Para realizar un análisis del vuelo es necesario supervisar la pantalla de la Estación Terrestre en tiempo real y así determinar ciertos aspectos como la trayectoria, variación de ciertos parámetros mediante gráficas, velocidad, orientación, etc. Sin embargo, como lo describimos anteriormente, existen los *registros de vuelo* que nos permiten reproducir los datos de vuelo una vez finalizado el mismo, esto es mucho más cómodo dado que no tenemos que supervisar simultáneamente el vuelo real del dron y sólo debemos concentrarnos en la revisión del vuelo sin tener el vehículo funcionando.

5.6.1 Herramientas para el análisis de registros

Para realizar un análisis del comportamiento del dron durante un vuelo, lo más recomendable es acceder al registro de vuelo y consultar los parámetros que deseamos. Para ello existen diversas herramientas de software denominadas **Log Analyzer** que nos permiten cargar los registros y nos muestran más a detalle la información asociada al vuelo del dron. A continuación, pasamos a nombrar algunas de las alternativas más conocidas:

- **MAVExplorer**

MAVExplorer es una herramienta de exploración de registros. Se basa en los mismos conceptos que el mavgraph (es una herramienta que grafica datos de vuelo y está incluida en MAVProxy, que es un software GCS), pero es interactivo y admite un modelo de contribución comunitaria para gráficos predefinidos. Este software permite utilizar gráficos predefinidos y modificarlos, graficar manualmente cualquier dato del registro, visualizar trayectorias de vuelo en un mapa, entre otras características.

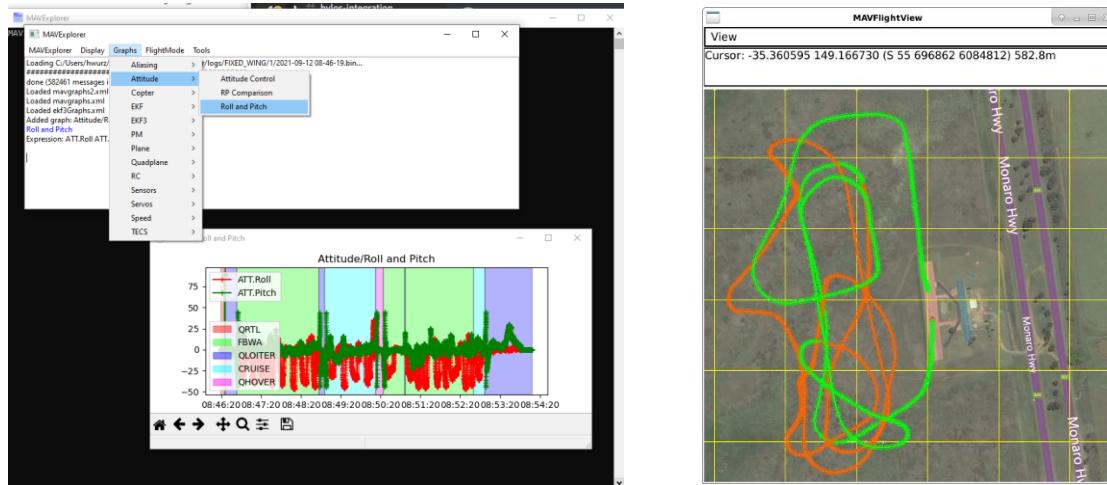


Figura 118 – Análisis de registros de vuelo con MAVExplorer

▪ Mission Planner

Como se vio anteriormente, Mission Planner es un software GCS (Ground Control Station) que nos permite configurar y supervisar el funcionamiento de un dron. Sin embargo, también tiene la capacidad de analizar registros de vuelo (registros dataflash o de telemetría) y, a partir de ellos, reproducir un vuelo, visualizar datos de vuelo individuales mediante gráficas, creación de imágenes 3D de la ruta de vuelo, entre otras características que nos permitirán hacer un diagnóstico del vuelo realizado.



Figura 119 – Análisis de registros de vuelo con Mission Planner

▪ QGroundControl

QGroundControl es el software GCS que hemos utilizado en el desarrollo de este trabajo y, al igual que Mission Planner, también tiene la capacidad de reproducir los datos de vuelo a partir de un registro. De esta forma, mientras reproducimos un vuelo, podemos hacer uso de una herramienta de análisis denominada **MAVLink Inspector**. Esta herramienta viene incluida dentro del menú “Application Settings” del QGroundControl y proporciona información en tiempo real y gráficos del tráfico MAVLink recibido por QGroundControl. Esta función está destinada principalmente a desarrolladores de pilotos automáticos/creadores de vehículos, pero es una buena utilidad y ya viene integrada en el software GCS.

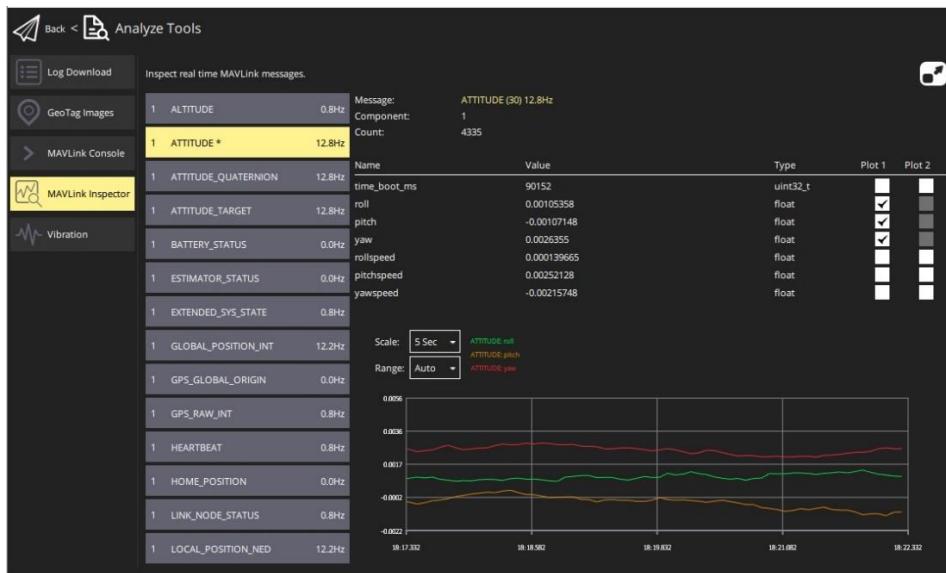


Figura 120 – Análisis de registros de vuelo con QGroundControl

▪ UAV LogViewer

UAV Log Viewer, como su nombre lo indica, proporciona un visor fácil de usar para los registros de telemetría y dataflash de ArduPilot. Los datos se pueden trazar e incluso manipular, y el vuelo se puede reproducir visualmente en 3D. Este analizador es una herramienta online y está basado en la web, aunque la mayoría de los cálculos se realizan localmente en el navegador web. Tanto Chrome/Chromium como Firefox son navegadores compatibles.

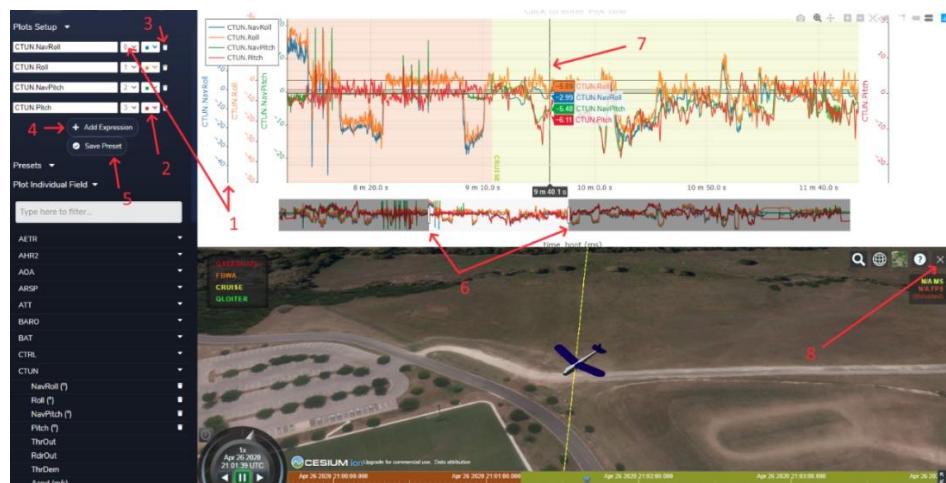


Figura 122 – Análisis de registros de vuelo con UAV LogViewer

▪ Dronee Plotter

Dronee Plotter es una herramienta online gratuita que nos permite analizar los registros de vuelo y ofrece características multi-gráfico y multi-escala. Nos ofrece una interfaz bastante simple y podemos visualizar varios atributos del registro en varios gráficos, hacer zoom al marco de tiempo de forma sincrónica, visualizar las rutas trazadas en mapas, ver los mensajes recibidos, etc.



Figura 121 – Análisis de registros de vuelo con Dronee Plotter

▪ Airdata UAV

Airdata UAV se construyó inicialmente para proporcionar información de prevención de accidentes y brindar (a los pilotos) datos mucho más amplios de lo que normalmente se captura en un *logbook* (bitácora de vuelos). En la actualidad ofrece una plataforma integral de operación de gestión de flotas de drones que brinda funciones avanzadas de análisis para vuelos más seguros y fiables. Esta es una herramienta de análisis online de pago, por lo tanto, es necesario pagar una suscripción mensual para acceder a todas las funciones de análisis. Sin embargo, la versión gratuita nos ofrece muchas herramientas de análisis que son suficientes para los pilotos aficionados, es decir, que nos permite cargar los registros de vuelo, graficar parámetros, visualizar las rutas de vuelo, etc.

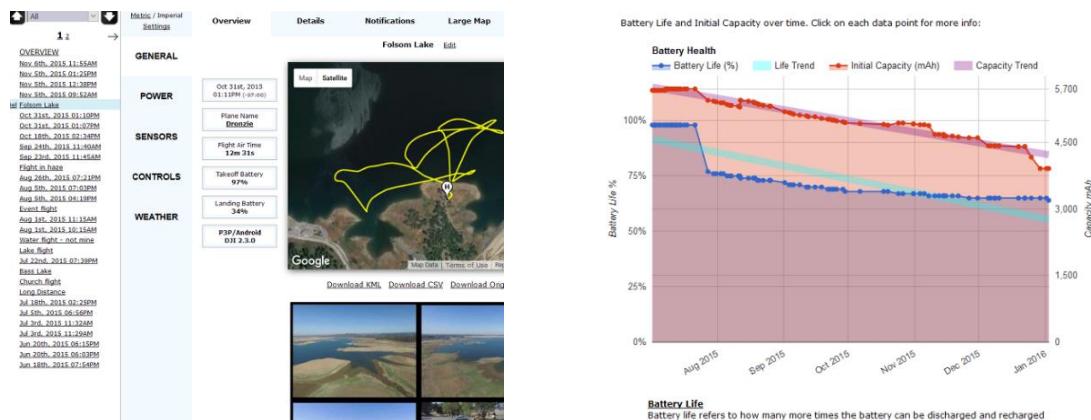


Figura 123 – Análisis de registros de vuelo con Airdata UAV

5.6.2 Registros de vuelo en QGroundControl

QGroundControl es el software GCS que utilizamos para configurar nuestro dron y supervisar su vuelo. En este apartado, vamos a explicar cómo podemos acceder a los registros de vuelo mediante QGroundControl y, a partir de estos, podremos reproducir los vuelos realizados y analizar las variaciones de los parámetros del vehículo.

Descarga de registros de vuelo

Existen dos formas de acceder a los registros de vuelo mediante QGroundControl. Según el método utilizado, se obtendrán distintos formatos de archivos, pero, en definitiva contienen la misma información.

- Registros dataflash (.bin)

En este caso, los registros de vuelo se acceden desde el menú “**Analyze Tools > Log Download**” de QGroundControl donde se listan todos los registros de vuelo y podemos eliminarlos o descargarlos a nuestra PC. Debemos tener en cuenta que es necesario tener el dron encendido y conectado al software GCS mediante telemetría o cable usb. Los archivos tienen el formato “*log_X_AAAA-MM-DD-hh-mm-ss.bin*” y se pueden abrir con casi cualquier Log Viewer.

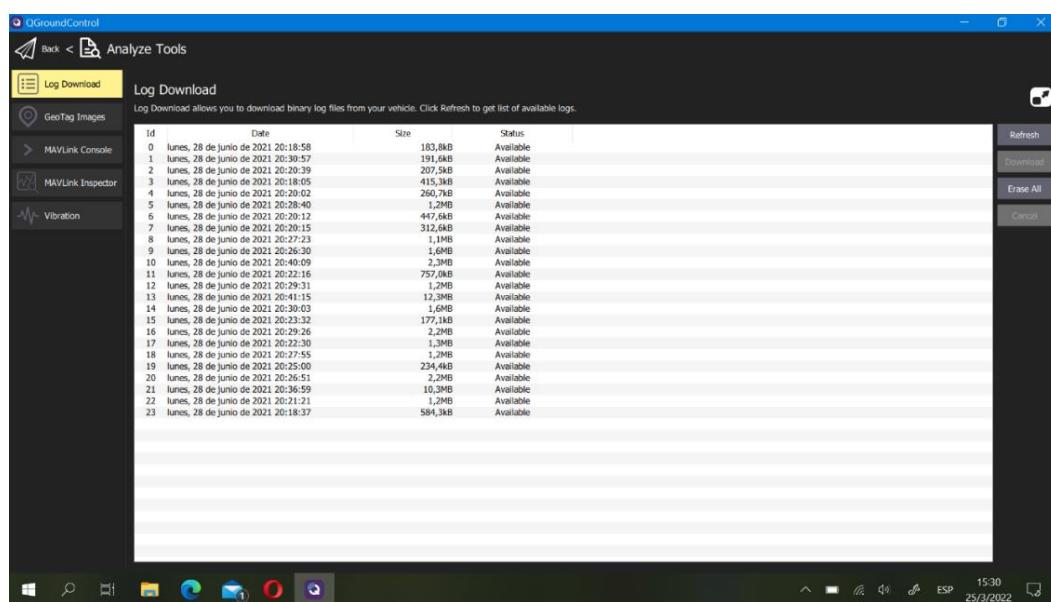


Figura 124 – Descarga de registros dataflash con QGroundControl

- Registros de telemetría (.tlog)

Los registros de telemetría son grabaciones de los mensajes de telemetría MAVLink enviados entre la controladora de vuelo y la Estación Terrestre. Se crean automáticamente cada vez que se establece la conexión entre el dron y QGroundControl y tienen el formato “*AAAA-MM-DD-hh-mm-ss.tlog*”. Por defecto, se guardan localmente en la PC en una carpeta llamada “**Telemetry**” dentro de la carpeta “QGroundControl” que se crea cuando se realiza la instalación del software GCS. En nuestro caso, la ubicación predeterminada de los registros es “*C:/Users/DENIS/Documents/QGroundControl*” pero se puede modificar desde

los ajustes del software GCS. La desventaja de los “tlog” es que no todas las aplicaciones Log Viewer pueden abrirlos, así es que tenemos menos alternativas de visualización.

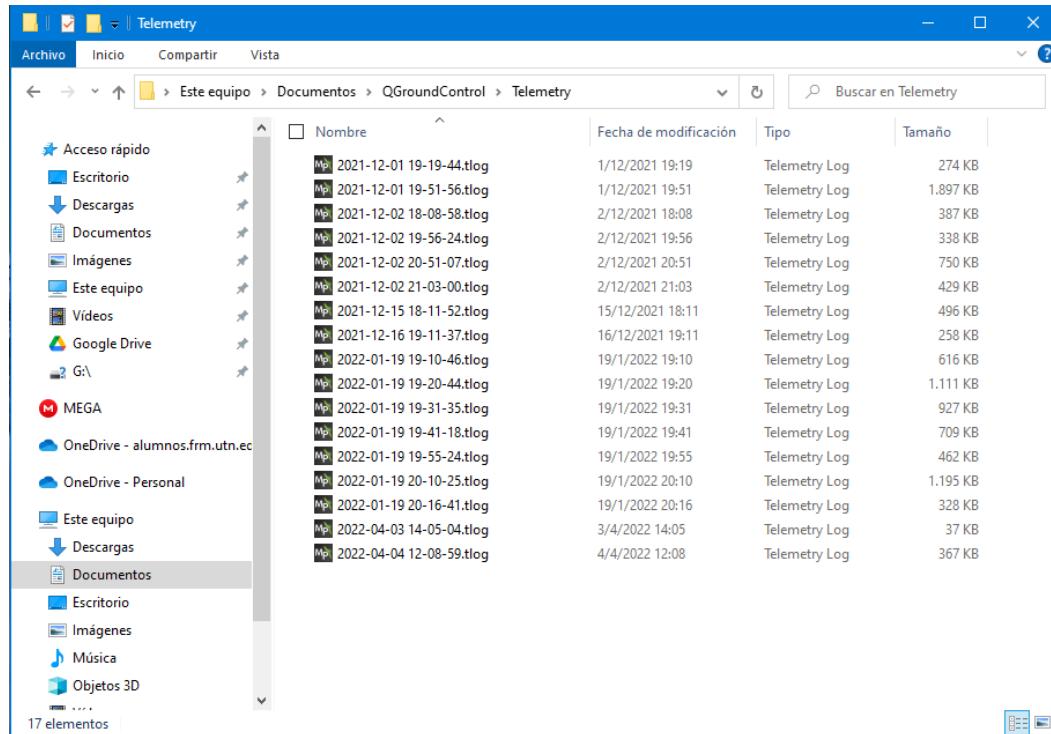


Figura 125 – Registros de vuelo almacenados localmente con QGroundControl

De lo explicado anteriormente, vemos que los registros de telemetría (.tlog) son los registros de vuelo más accesibles al usuario en caso de realizar un análisis de los vuelos, además no es necesario tener el dron conectado a QGroundControl. Por otro lado, para descargar los registros dataflash (.bin), si o si debemos tener el dron encendido y conectado a la estación Terrestre (notebook) y, además, este método tiene la desventaja de que las velocidades de descarga son muy bajas y el proceso suele demorar mucho tiempo e incluso, a veces, falla la descarga. Por esto, lo más recomendable es usar los registros de telemetría (.tlog) para la depuración de los vuelos realizados.

Reproducir datos de un vuelo

Si bien esta utilidad está destinada principalmente a desarrolladores, podemos utilizarla para hacer un análisis de los parámetros de vuelo del dron. La función **Replay Flight Data** permite a los usuarios reproducir un registro de telemetría (.tlog), lo que permite la revisión de vuelos pasados o problemáticos. El vuelo se puede iniciar, pausar, detener, reiniciar, etc.

Para reproducir un vuelo debemos realizar los siguientes pasos:

- 1- Desconectar las conexiones activas.
- 2- Seleccionar el menú “Application Settings > General > Fly View”.
- 3- Marcar la casilla “Show Telemetry Log Replay Status Bar” para que aparezca la barra de reproducción de vuelo en la parte inferior de la pantalla de QGroundControl.

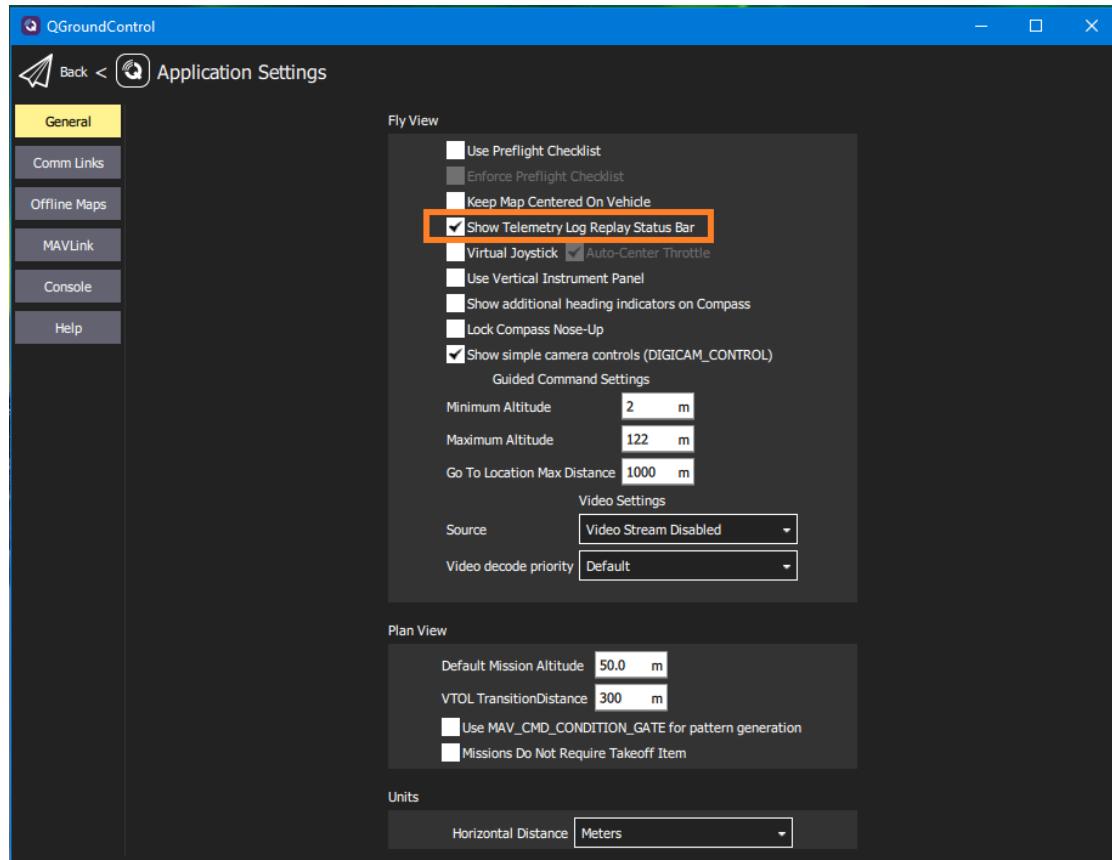


Figura 126 – Habilitar la función de carga de registros de telemetría en QGroundControl

- 4- Seleccionamos el botón “Load Telemetry Log” y cargamos uno de los registros de telemetría disponibles en nuestra PC. Luego, QGroundControl comenzará a reproducir inmediatamente el registro.

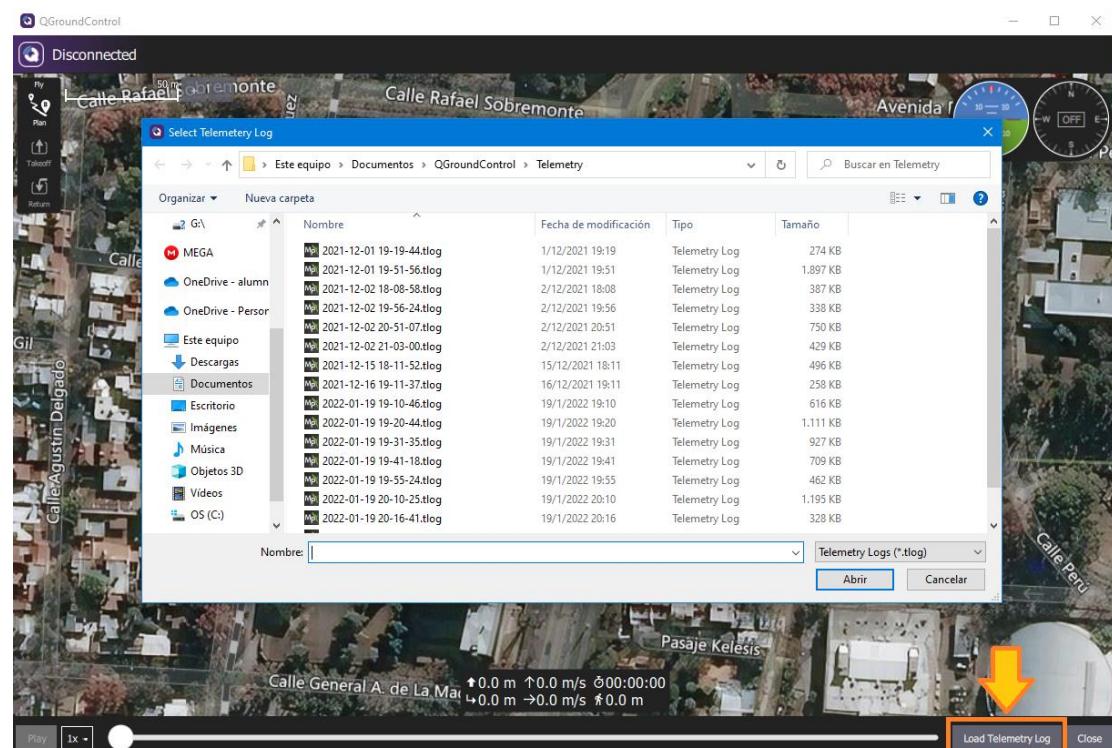


Figura 127 – Cargar registro de telemetría en QGroundControl

MAVLink Inspector

Una vez que cargamos un registro de telemetría, inmediatamente la pantalla comenzará a reproducir el vuelo como si fuera en tiempo real y nos dará una vista como la que se muestra a continuación:

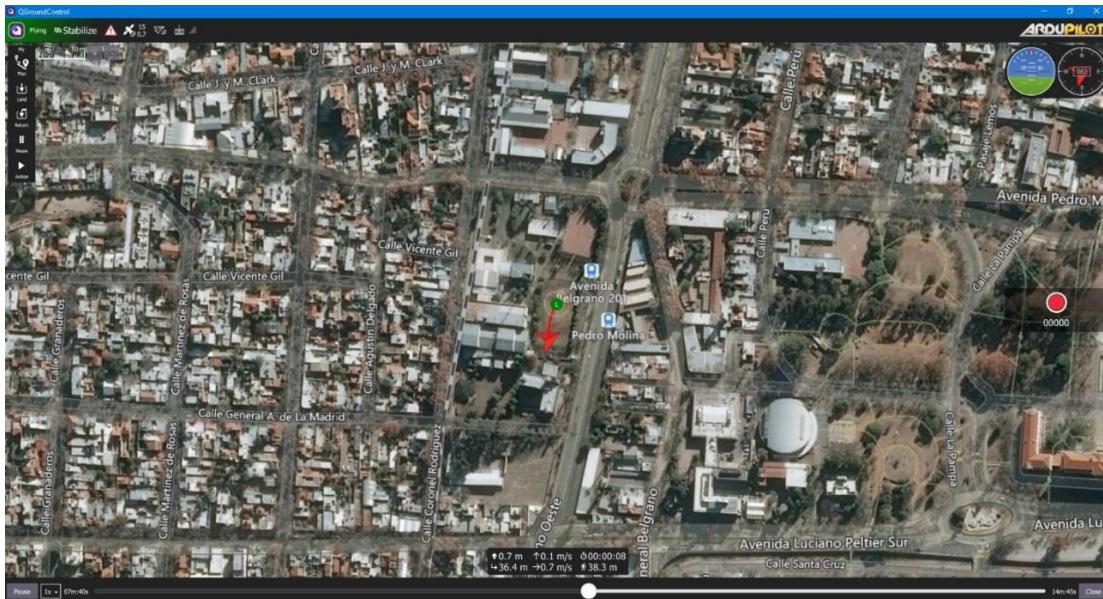


Figura 128 – Reproducción de un vuelo con QGroundControl

Mientras revisamos el vuelo, podemos utilizar la función MAVLink Inspector que nos permitirá conocer el estado de distintos parámetros de conforme va avanzando el vuelo del dron.

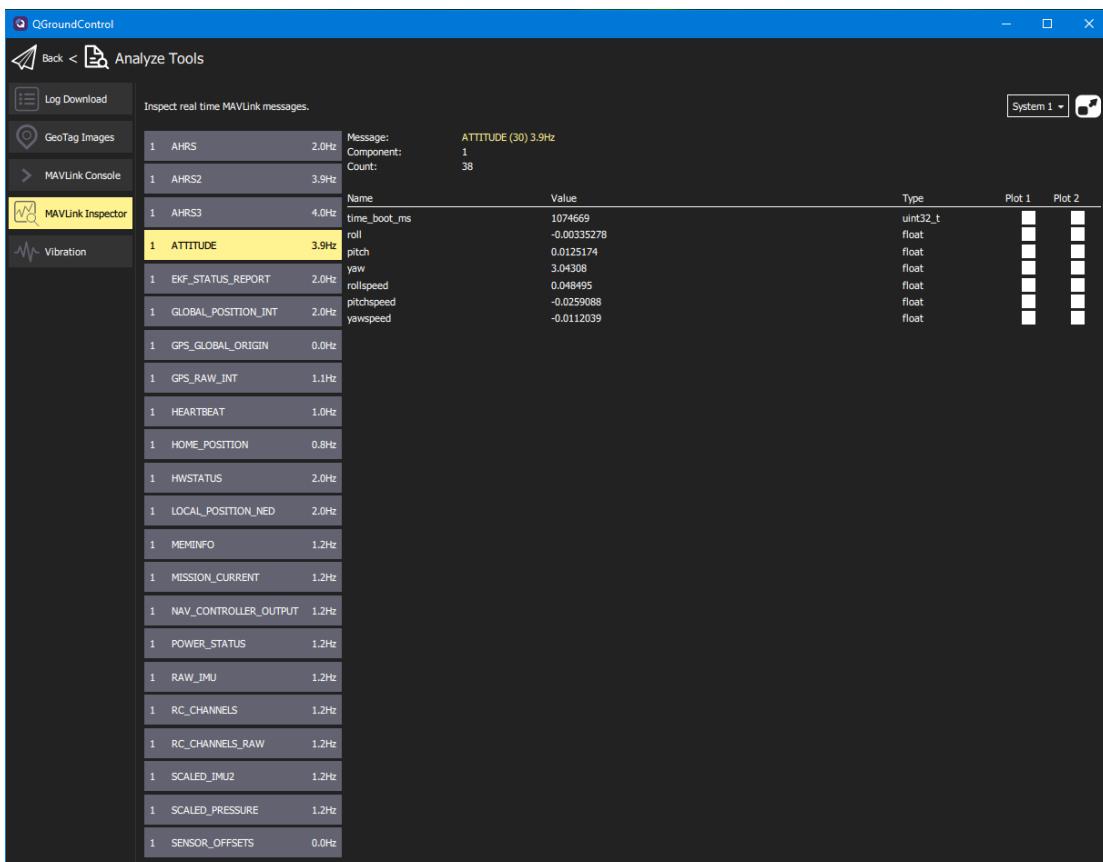


Figura 129 – Vista general de MAVLink Inspector

MAVLink Inspector enumera todos los mensajes recibidos por el vehículo actual, junto con su identificador de componente de origen y la frecuencia de actualización. Se puede seleccionar cada uno de los mensajes para obtener el identificador del mensaje, el identificador del componente de origen y los valores de todos los campos individuales. También, podemos trazar los valores de los campos en tiempo real, seleccionando varios campos de varios mensajes para mostrarlos en uno de los dos gráficos disponibles.

Para utilizar MAVLink Inspector debemos:

- 1- Abrir la vista “Analyze Tools” accediendo al menú de la aplicación (ícono Q).
- 2- Seleccionamos la opción “MAVLink Inspector” en la barra lateral. La vista comenzará a llenarse con mensajes a medida que se reciban.
- 3- Seleccionamos un mensaje para ver sus campos y su valor (actualización dinámica).
- 4- Para trazar las gráficas, debemos habilitar las casillas de verificación junto a los campos.

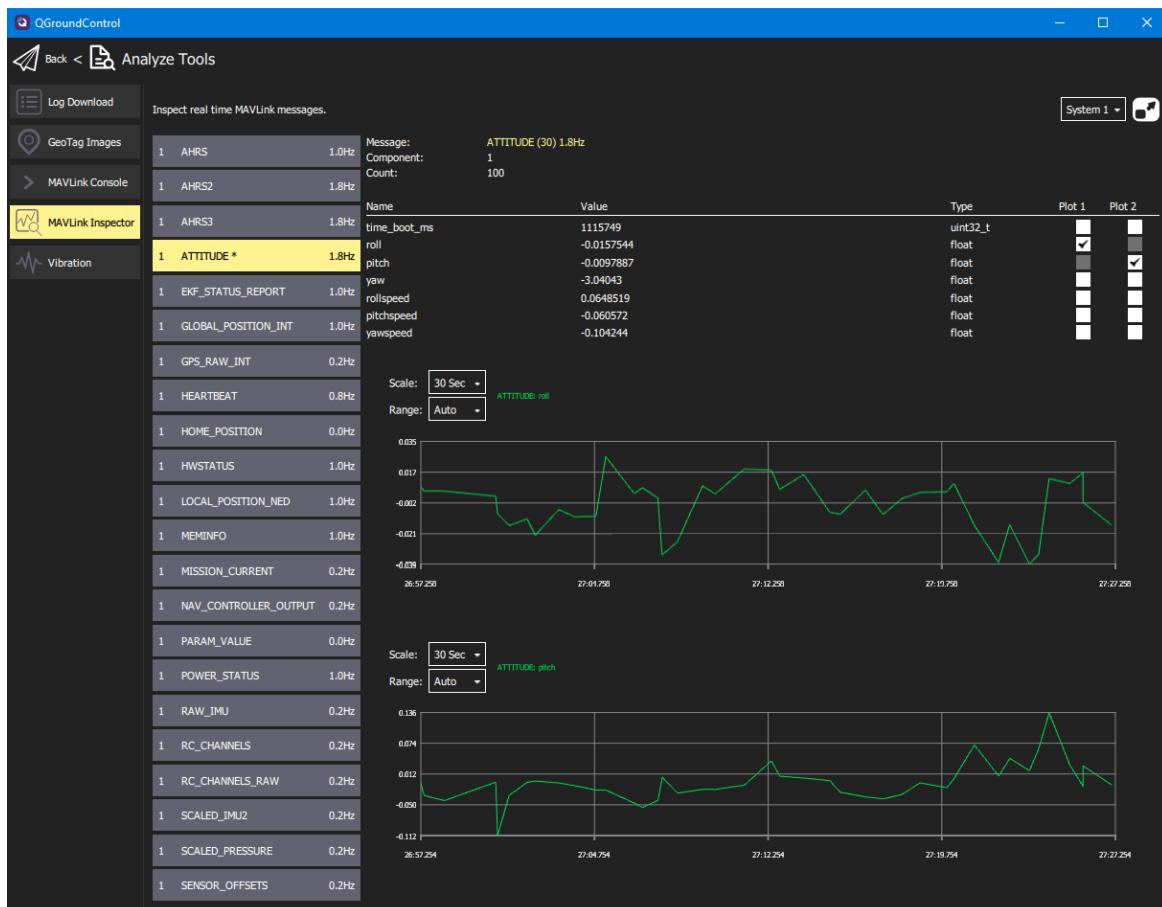


Figura 130 – Gráfica del mensaje ATTITUDE (parámetros roll y pitch)

En la gráfica anterior, podemos visualizar los parámetros roll (alabeo) y pitch (cabeceo) que vienen incluidos en el mensaje ATTITUDE y que representan la actitud del dron, es decir la inclinación del vehículo.

De la misma forma, podemos usar MAVLink Inspector para trazar las gráficas de diversos parámetros de vuelo que están incluidos en los mensajes que envía el dron a QGroundControl durante el vuelo.

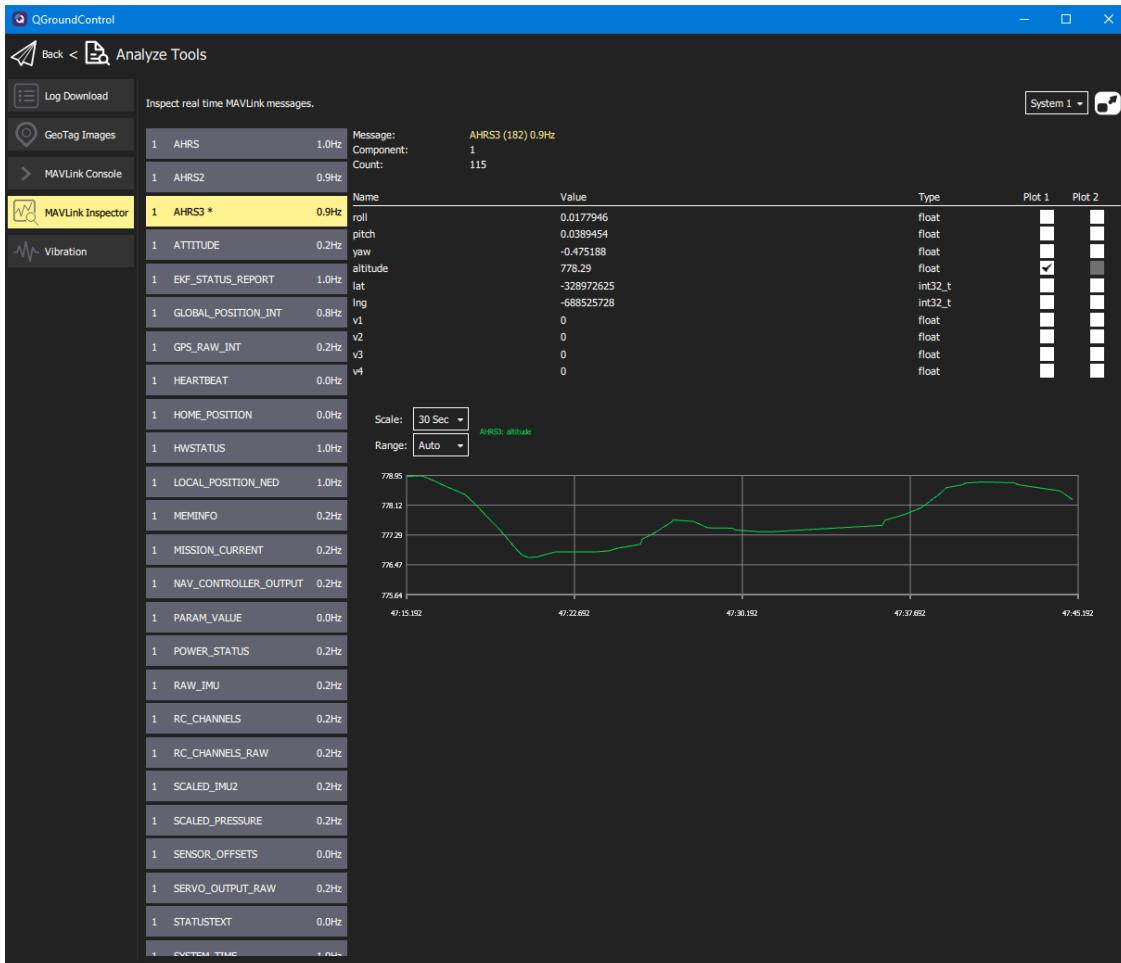


Figura 131 – Gráfica del mensaje AHRS3 (parámetro “altitude”)

La gráfica anterior muestra el parámetro ALTITUDE que representa el perfil de elevación del dron a medida que va volando. Debemos tener en cuenta que los datos están referidos a una altura absoluta (sobre el nivel del mar), por lo tanto, el suelo está representado por 774 [m] en la ubicación donde realizamos el vuelo (ciudad de Mendoza).

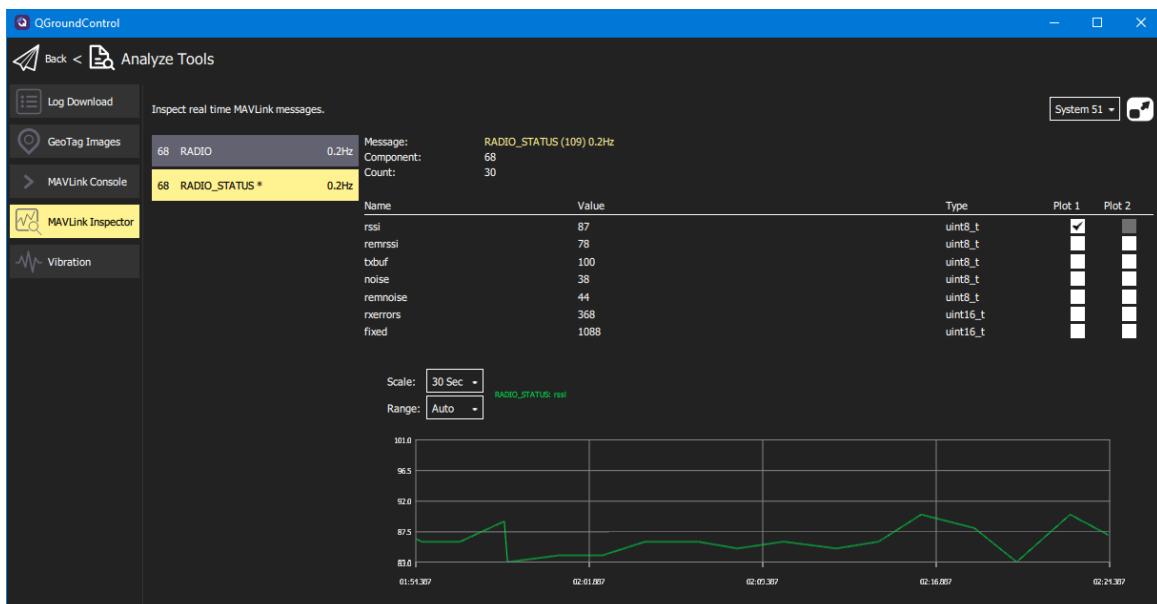


Figura 132 – Gráfica del mensaje RADIO_STATUS (parámetro “rssi”)

De la misma forma, esta gráfica muestra el estado del parámetro RSSI (Received Signal Strength Indication) que representa la intensidad de señal RC recibida en el multicóptero.

5.6.3 UAV LogViewer

Tal como su nombre lo indica, UAV LogViewer es un visor de registros de UAV (Unmanned Aerial Vehicle – Vehículo Aéreo No Tripulado). Está basado en Javascript para telemetría de MAVLink y registro de flujo de datos. Admite registros dataflash (.bin) y registros de telemetría (.tlog), por lo tanto, es una herramienta muy completa para el análisis de vuelo.

Descripción general

UAV LogViewer es una herramienta online y accedemos a ella mediante un navegador web. Al ingresar, se presenta el siguiente panel:

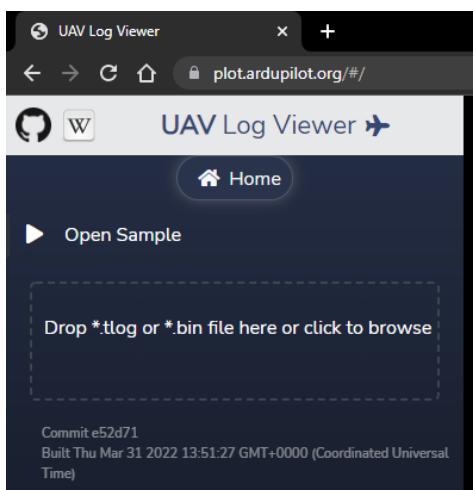


Figura 133 – Pantalla inicial de UAV LogViewer

Podemos abrir un archivo de ejemplo (“Open Sample”) para experimentar, o cargar un archivo de registro ArduPilot “.tlog” o “.bin” ya sea arrastrando y soltando o haciendo clic para obtener un cuadro de diálogo del explorador de archivos para seleccionar el archivo.

Una vez que se carga un registro, si tiene datos GPS, mostrará la siguiente pantalla:



Figura 134 – Pantalla principal de UAV LogViewer

Esta pantalla es el visor de vuelo 3D. Podemos reproducir un vuelo en 3D presionando el botón “reproducir” (play), o “pausar” (pause), “retroceder” (reverse) o cambiar la “velocidad” (speed) de reproducción. En la parte superior derecha de la pantalla están disponibles varias herramientas/opciones de mapa. En la parte superior izquierda hay botones de menú de configuración para el gráfico, tales como, panel 3D y widgets adicionales para parámetros, mensajes de registro y un visualizador del tipo joystick para los primeros cuatro canales RC.

Análisis de un registro de vuelo

De la misma forma que utilizamos QGroundControl, ahora procedemos a cargar un registro de telemetría en UAV LogViewer para visualizar algunos parámetros de vuelo y una gráfica de las rutas trazadas.

Para comenzar a usar el visor de registros debemos realizar lo siguiente:

- 1- Cargamos un archivo en el visor de registros haciendo clic en “drop *.tlog or *.bin file here or click to browse” para habilitar la ventana de búsqueda.

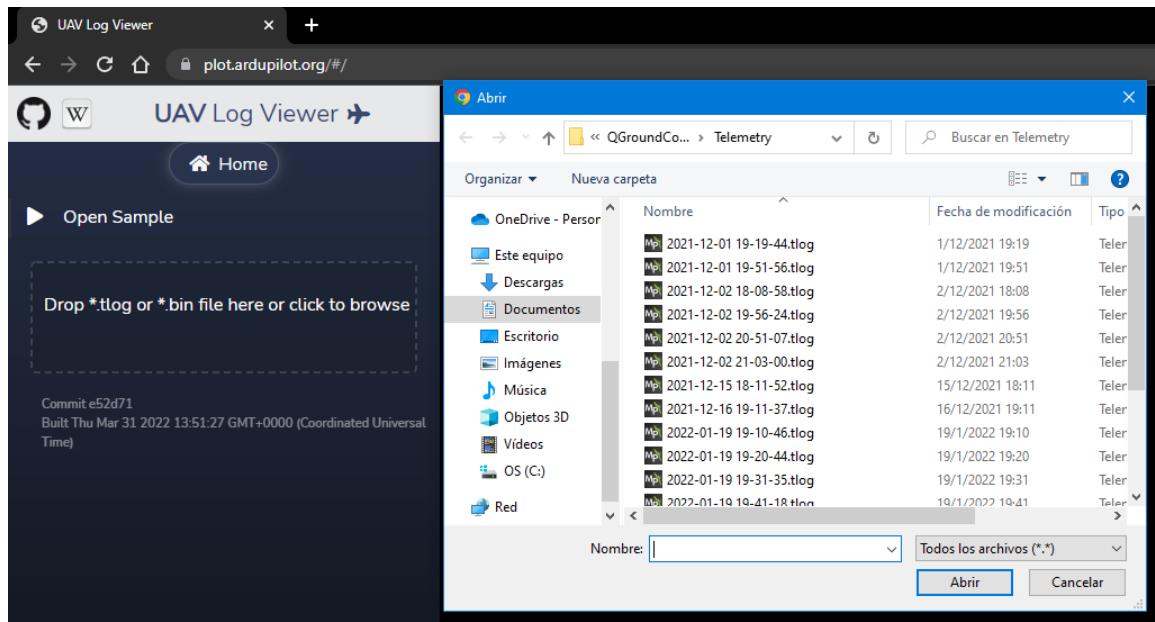


Figura 135 – Carga de registro de telemetría en UAV LogViewer

- 2- Se presentará una vista general en 3D de la trayectoria de vuelo en un mapa. En nuestro caso cambiaremos el mapa por “Bing Maps Aerial with Labels” en la parte superior derecha de la pantalla. Esto ofrecerá una mejor visualización y mostrará etiquetas con los nombres de las calles y lugares.

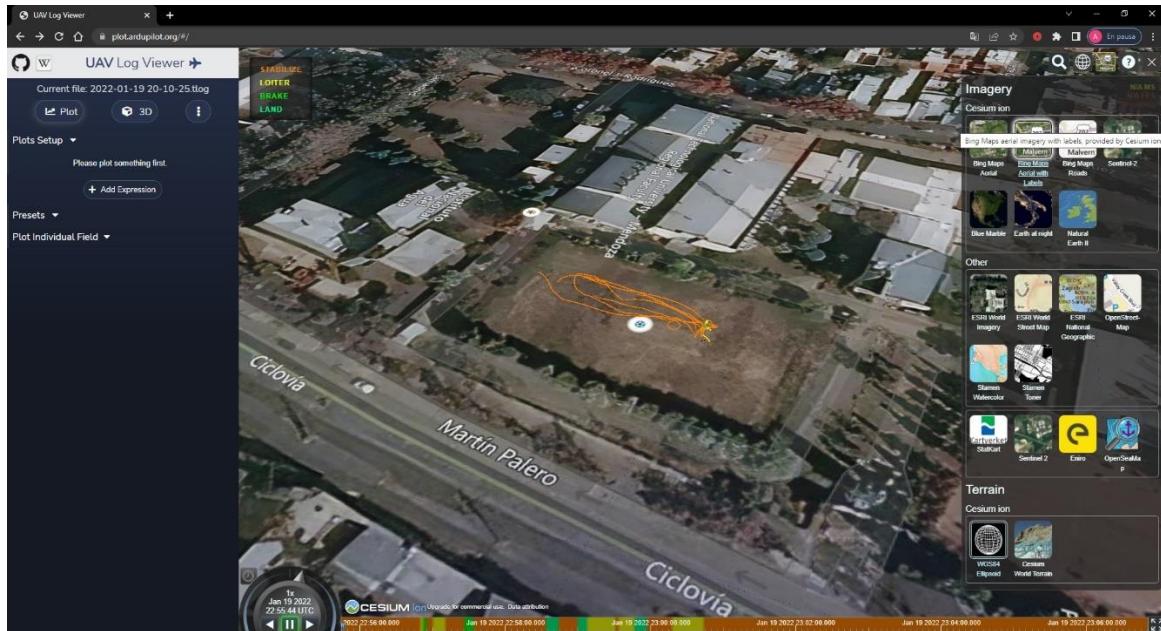


Figura 136 – Vista 3D de un registro de telemetría en UAV LogViewer

- 3- Reproducimos el vuelo presionando el botón “play” en la parte inferior de la pantalla. Para una mejor visualización, podemos hacer zoom en el mapa con la rueda del mouse y, además, aumentar el tamaño del modelo del dron mediante el control deslizante “Wingspan (m)”. Esto nos permitirá apreciar mucho mejor la altura y la inclinación del vehículo mientras se reproduce el vuelo.



Figura 137 – Reproducción de un registro de telemetría con UAV LogViewer

- 4- Para trazar las gráficas de los parámetros, debemos acceder al menú “Plot” en la esquina superior izquierda de la pantalla. Para empezar, podemos utilizar el menú desplegable “Presets” que nos permite elegir entre muchas combinaciones de gráficos de datos más utilizados ya preconfigurados. En nuestro caso, graficaremos los parámetros “roll” (alabeo)

y “pitch” (cabeceo) que vienen incluidos en el mensaje ATTITUDE y representan la inclinación del dron.

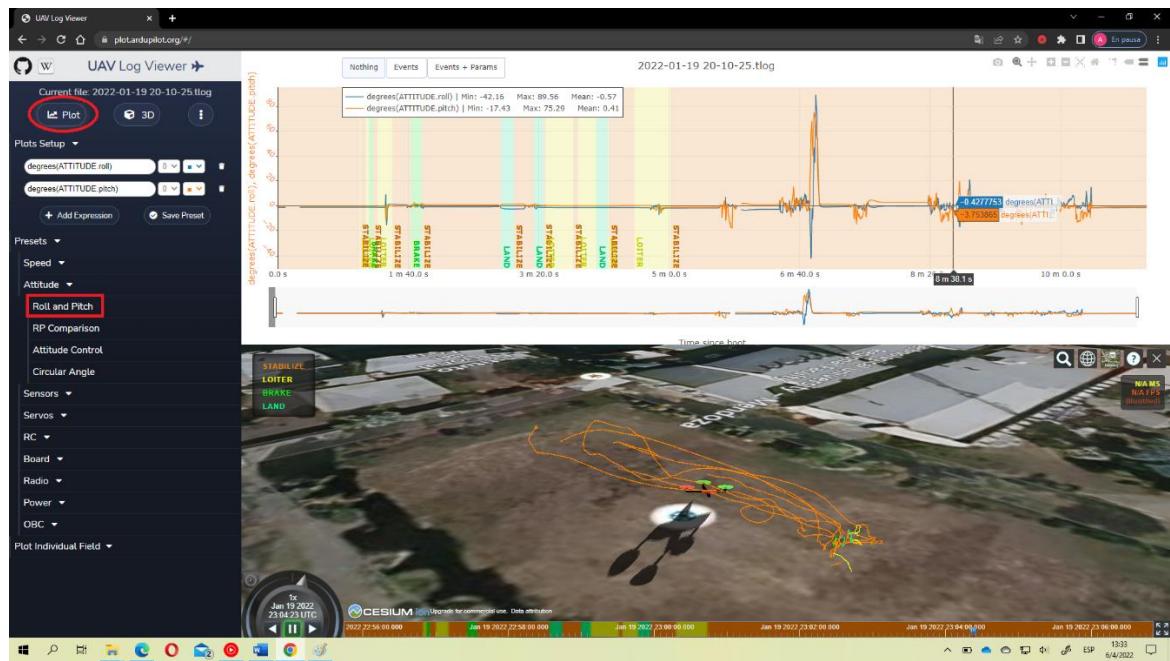


Figura 138 – Gráfica del mensaje ATTITUDE (parámetros roll y pitch)

A medida que movemos el cursor sobre la gráfica podemos ver cómo cambian los valores de los parámetros conforme el dron se va moviendo sobre el mapa.

- 5- También podemos usar los “Widgets” disponibles al hacer clic en la parte superior izquierda de la pantalla marcada por los “tres puntos”. Hay ocho opciones disponibles que nos permitirán mostrar los parámetros de búsqueda, posición de los sticks RC, mensajes recibidos, etc. En nuestro caso, seleccionamos los widgets “Radio Sticks” y “Attitude” que representan como varían los controles RC y la inclinación del vehículo, a medida que avanza el dron.



Figura 139 – Uso de widgets en UAV LogViewer

Tal como describimos en los pasos anteriores, es posible trazar gráficas de diversos parámetros que vienen incluidos en los mensajes almacenados en el registro de telemetría. A diferencia de MAVLink Inspector (QGroundControl), este visor de registros ofrece mayores funcionalidades y las gráficas no son en tiempo real, sino que trazan la variación de los parámetros durante todo el vuelo o vuelos.

Además, si queremos verificar el estado de parámetros más específicos que no figuran en el menú desplegable “Presets”, podemos acceder al apartado “Plot Individual Field” del menú “Plot”. En este apartado podemos trazar las gráficas de todos los parámetros almacenados en el registro de telemetría, esto es seleccionando un campo del menú desplegable o simplemente usando el cuadro de búsqueda.



Figura 140 – Gráfica del mensaje VIBRATION en UAV LogViewer

En la figura anterior, se graficó el mensaje VIBRATION que representa los niveles de vibración registrados por el vehículo y se especifica por cada uno de los 3 ejes (x, y, z) del espacio. Se puede apreciar claramente que los niveles de vibración comienzan a manifestarse cada vez que armamos (armed) el dron y finalizan cuando desarmamos (disarmed) el vehículo, es decir cuando apagamos los motores con el transmisor RC.

De la misma forma, también podríamos verificar el recuento de satélites GPS disponibles mientras se desarrolla un vuelo.



Figura 141 – Gráfica del mensaje GPS_RAW_INT en UAV LogViewer

El mensaje GPS_RAW_INT incluye, entre otros campos, el parámetro “satellites_visible” que muestra el número de satélites GPS visibles por la controladora de vuelo. De la gráfica anterior, se puede ver que el número varía entre 13 y 17 satélites visibles en una zona con muchos obstáculos alrededor, tales como, edificios, antenas, líneas de tendido eléctrico, etc. En lugares cerrados como un aula de laboratorio, el recuento de satélites apenas llega a 6 o incluso 0.

5.6.4 Creación de archivos KMZ con Mission Planner

Existen diversas aplicaciones que nos permiten analizar un registro de vuelo, una de ellas es Mission Planner. Es un software GCS, pero también permite hacer un diagnóstico del comportamiento de un multicóptero a partir de los registros de dataflash (.bin) o registros de telemetría (.tlog). Una de las características más interesantes es la creación de imágenes 3D de la ruta de vuelo a partir de los registros de vuelo. Esta función permite cargar un registro de vuelo (.bin o .tlog) y convertirlo en un archivo KMZ compatible con Google Earth, de forma tal de poder visualizar la trayectoria de vuelo en tres dimensiones.

Archivos KMZ

KMZ (Keyhole Markup language Zipped) es una versión comprimida en zip de un archivo KML (Keyhole Markup Language), el cual se encarga de almacenar las ubicaciones de mapas que se pueden ver en varias aplicaciones de sistemas de información geográfica (GIS), sobre todo Google Earth. Un archivo KMZ puede contener marcas de posición, las cuales pueden incluir en su interior un nombre personalizado, las coordenadas de latitud y longitud, los datos del modelo 3D de COLLADA (COLLAborative Design Activity), así como superposiciones e imágenes a las que hace referencia el archivo KML. Estos archivos han sido especialmente diseñados para poder reducir el espacio que ocupan los archivos KML, de forma que sean más fáciles de distribuir y compartir con varios usuarios.

En este apartado, vamos a crear un archivo KMZ a partir de un registro de telemetría creado en QGroundControl. Para ello, instalamos Mission Planner en nuestra PC Windows desde <https://firmware.ardupilot.org/Tools/MissionPlanner/MissionPlanner-latest.msi> y utilizamos la herramienta de análisis “Logs Telemetría” que, entre otras funciones, nos permite exportar un registro de vuelo en formato KML y KMZ.

Para crear un archivo KMZ en Mission Planner, debemos hacer lo siguiente:

- 1- Abrimos la pantalla “Datos de Vuelo” (DATA) de Mission Planner.
- 2- Hacemos clic en la pestaña “Logs Telemetría”.
- 3- Presionamos el botón “Log > KML”.
- 4- Se abrirá una ventana y presionamos el botón “Crear KML”
- 5- Se abrirá el explorador de archivos y seleccionaremos el registro “tlog”.

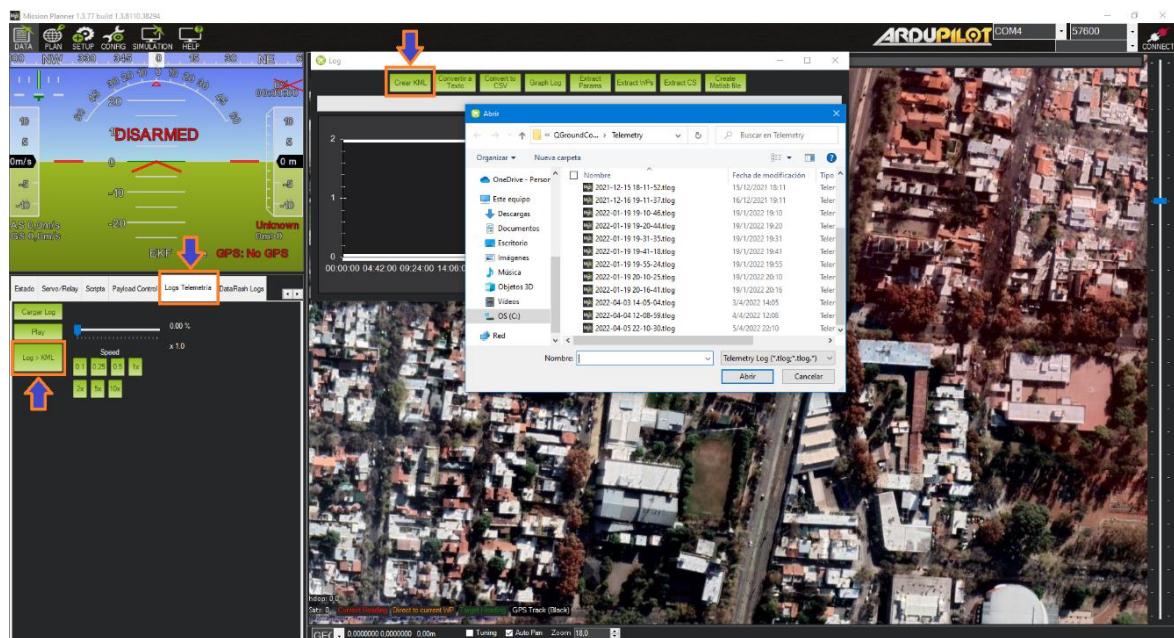


Figura 142 – Creación de un archivo KMZ en Mission Planner

Una vez realizados los pasos anteriores, se creará un archivo “.kmz” y “.gpx” junto al archivo “.tlog” original y esto se puede abrir en Google Earth para ver interactivamente la ruta de vuelo 3D. Una vez que instalemos [Google Earth](#), simplemente debemos hacer doble clic en el archivo KMZ y automáticamente podremos ver la ruta de vuelo en la aplicación.



Figura 143 – Ruta de vuelo en Google Earth

Como se ve en la imagen anterior, la ruta de vuelo viene marcada por una serie de puntos azules que representan coordenadas geográficas y contienen los valores de los parámetros “roll”, “pitch” y “yaw” que representan la inclinación del dron. Las zonas donde los puntos están más alejados unos de otros nos indica que el dron viajaba a mayor velocidad. Además, vemos que el mapa ofrece una mejor vista 3D y mayores detalles en cuanto a las instalaciones de los alrededores, calles, arboleda, etc.

También, existe la posibilidad de reproducir el viaje que fue realizando el dron y graficar un modelo 3D de la ruta.

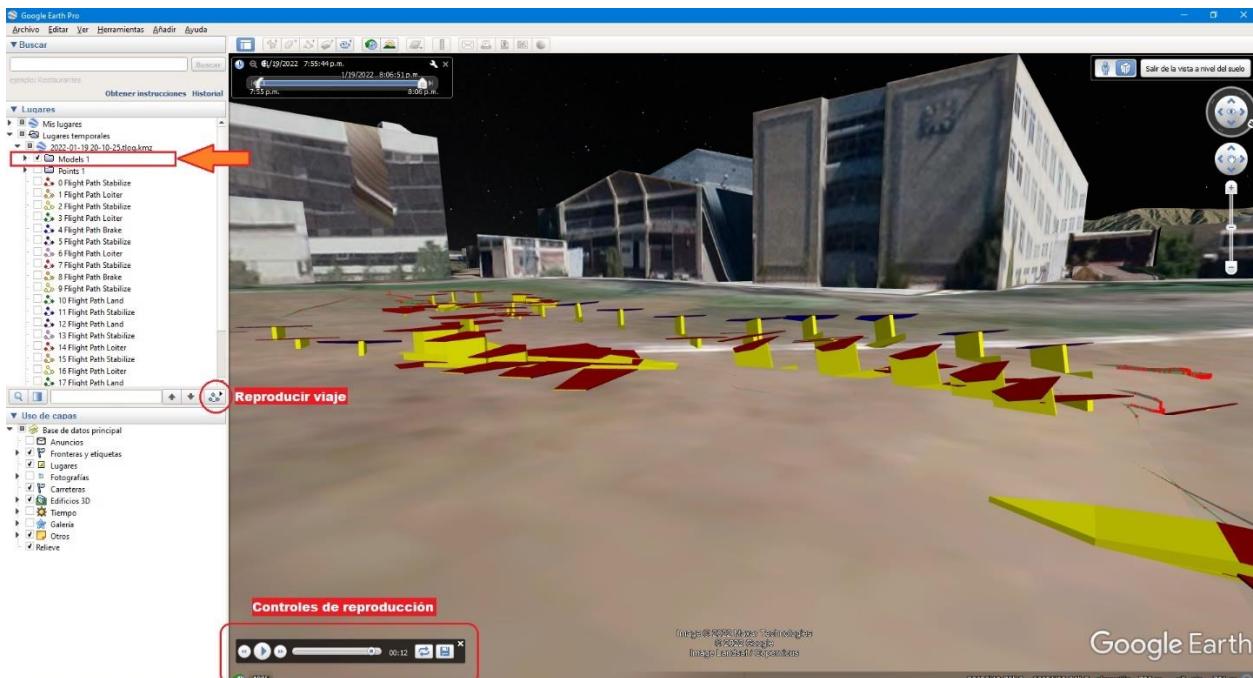


Figura 144 – Reproducción de un vuelo en Google Earth

Como se puede observar, Google Earth traza un modelo 3D del dron y del mapa en general. Se puede reproducir el viaje desde distintos ángulos y de esta forma tener una noción más precisa de la zona de vuelo.

Google Earth es una herramienta muy ilustrativa para reproducir los vuelos de nuestro dron, pero no ofrece muchas funciones de análisis como UAV LogViewer. Sin embargo, podemos obtener información sobre los puntos de la ruta de vuelo, es decir, los valores de los parámetros roll, pitch y yaw. Otro parámetro que podemos visualizar es el perfil de elevación del multicóptero a medida que va avanzando por los puntos de la ruta de vuelo.

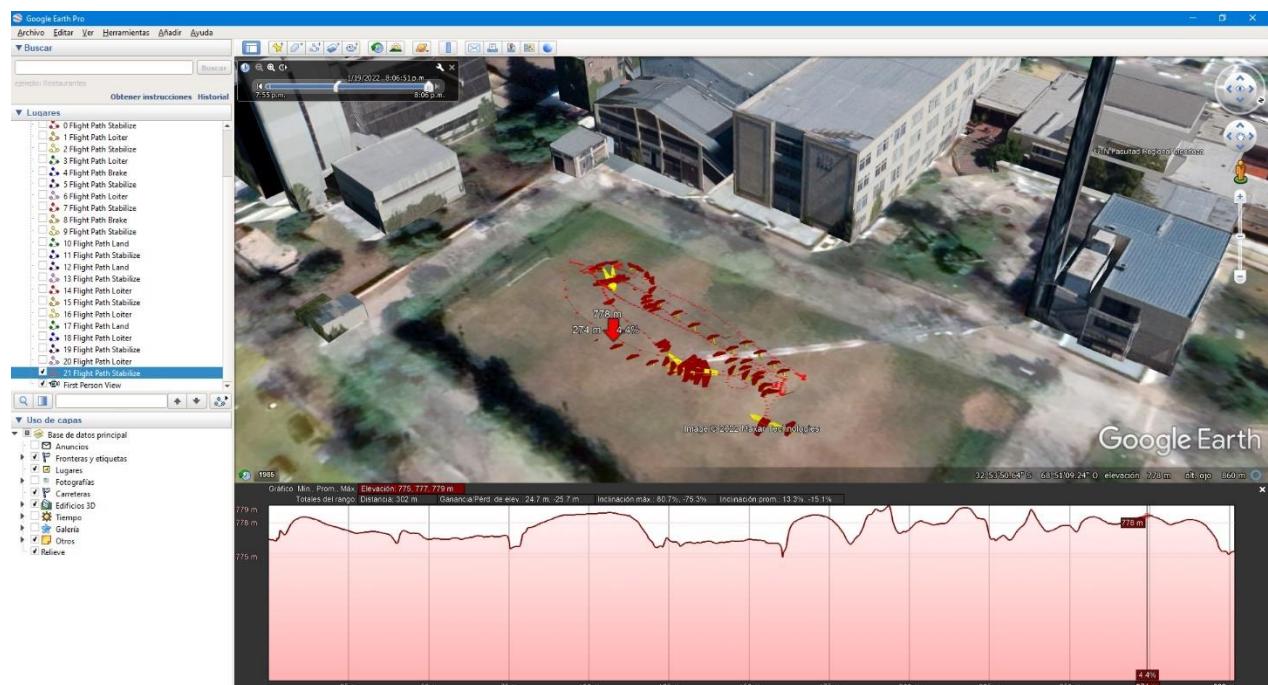


Figura 145 – Perfil de elevación de un registro de vuelo en Google Earth

Nuevamente, los datos registrados por el dron están referidos a una altura absoluta (sobre el nivel del mar), por lo tanto, debemos tener en cuenta que el suelo viene representado por 774 [m] aproximadamente.

6.0 CONCLUSIONES

Durante este proyecto se han observado las variables de las que depende un multicóptero o dron y la complejidad del sistema en general, así como la necesidad de poseer un conocimiento multidisciplinario para poder realizar un buen diseño y montaje de los componentes, y más importante aún, realizar las configuraciones de software de manera correcta.

Se ha conseguido que el dron funcione de forma satisfactoria, se controle a través del transmisor RC y se comunique con la Estación Terrestre mediante telemetría. El multicóptero se comunica con el software QGroundControl y permite su configuración, control y supervisión de vuelo. Se ha realizado un análisis sobre los registros de vuelo o “caja negra” que disponen todos estos tipos de

vehículos a fin de proporcionar una noción sobre las herramientas de depuración que se disponen, en caso de querer profundizar sobre los parámetros de vuelo.

Con todo lo mencionado anteriormente, podemos decir que se han alcanzado los objetivos planteados inicialmente, realizando las correcciones pertinentes durante el camino dada la falta de experiencia en este campo. También, nos hemos enfrentado a problemas que nos han hecho invertir más tiempo del deseado, destacando la imposibilidad de trabajar en el laboratorio dadas las restricciones COVID-19, la imposibilidad de reponer componentes del dron, la necesidad de aprendizaje en el uso de software desconocido o el requerimiento de conocimientos en distintos campos que aún no habían sido explorados como alumno de ingeniería.

El presente trabajo pretende sentar las bases para trabajos futuros que se centrarán en aplicaciones más específicas como la captura y procesado de imágenes, por dar un ejemplo. Para ello, será necesario profundizar los conocimientos en los apartados pertinentes e incursionar en la documentación disponible en Navio2 para desarrolladores.

7.0 BIBLIOGRAFÍA

- ❖ [Navio2 – piloto automático HAT para Raspberry Pi \(emlid.com\)](#)
- ❖ [DJI - Sitio web oficial](#)
- ❖ [Visión general · Guía del usuario de QGroundControl](#)
- ❖ [Copter Home — Documentación de Copter \(ardupilot.org\)](#)
- ❖ [Visor de registros de UAV \(ardupilot.org\)](#)
- ❖ [Descripción general del planificador de misiones — Documentación del planificador de misiones \(ardupilot.org\)](#)