

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y PROPULSIÓN
DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAVs)**

**SELECCIÓN, INSTALACIÓN, CONFIGURACIÓN Y
COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN FIRMWARE
DEDICADO PARA EL CONTROL DE VUELO DE UNA
PLATAFORMA AÉREA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

KAROL DANIELA HIDALGO MAYO

karol.hidalgo@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PATRICIO JAVIER CRUZ DÁVALOS, PhD.

patricio.cruz@epn.edu.ec

DMQ, Octubre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Karol Daniela Hidalgo Mayo declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

KAROL DANIELA HIDALGO MAYO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por KAROL DANIELA HIDALGO MAYO, bajo mi supervisión.

Ing. PATRICIO JAVIER CRUZ DÁVALOS, PhD.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Karol Daniela Hidalgo Mayo

Ing. Patricio Javier Cruz Dávalos, PhD.

DEDICATORIA

Mamá te dedico este trabajo y cada uno de mis años de estudio, tú me apoyaste de muchas maneras y me hiciste la persona que soy hoy en día. Me enseñaste a ser responsable y dedicada, y el valor del esfuerzo para alcanzar cualquier meta que me proponga. A confiar en mi inteligencia y en mi capacidad, a no subestimarme, y la importancia de la paciencia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco:

A mi madre, Gladys, por brindarme su apoyo incondicional y sus sabios consejos en los momentos más oportunos. Por su inmensa alegría y sus chistes agrios que igual terminan haciéndonos reír, por su corazón gigante y por ser una luz para las personas que la llegan a conocer.

A mi hermana mayor, Pamela, por su gran corazón y por haber sido incondicional con su familia a pesar de todo.

A mi hermana menor, Camila, por los debates más largos e interesantes acerca de temas random que solo nosotras entendemos y por enseñarme a ser más real conmigo misma.

A mi padre, Fernando, por ser incondicional para sus hijas y nunca rendirse. Por apoyarme cuando más lo necesitaba, cuidarme y por amar a mis gatas inmensamente.

A Daniel, mi novio, con quien he compartido mis alegrías y tristezas. De quien aprendí a disfrutar más de la vida, a no pensar solo en los estudios, y con quien puedo ser yo misma al 100%.

A Sebas, mi primer amigo desde el primer día del primer semestre, quien desde entonces me ha acompañado en las buenas y en las malas siendo incondicional. A Arturo y Alex, mis amigos de muchos años por estar siempre sin importar nada. A todos mis amigos, quienes se alegran sinceramente por mis logros y a quienes siempre tendré en mi corazón.

A quienes contribuyeron en el desarrollo de este trabajo de titulación. Renato, mi compañero de tesis por el apoyo mutuo. Erick, David y Francisco del grupo de investigación ATA por brindarme sus conocimientos y apoyarme durante las pruebas de vuelo de mi dron.

Al Dr. Patricio Cruz, mi tutor de tesis, por ser una excelente guía brindándonos consejos, tiempo y esfuerzo a lo largo de este año.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CERTIFICACIONES..... | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA..... | II |
| DEDICATORIA..... | III |
| AGRADECIMIENTO..... | IV |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | V |
| RESUMEN | VII |
| ABSTRACT | VIII |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 2 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.3 ALCANCE | 3 |
| 1.4 MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1.4.1 PLATAFORMA AÉREA A UTILIZAR..... | 4 |
| 1.4.1.1 Quad-rotor del proyecto de investigación PIM-21-01 | 4 |
| 1.4.1.2 Hardware – Controlador de Vuelo..... | 5 |
| 1.4.2 SOFTWARE DE PILOTO AUTOMÁTICO | 7 |
| 1.4.2.1 PX4..... | 8 |
| 1.4.2.2 ArduPilot | 8 |
| 1.4.2.3 Tabla Comparativa de modos de vuelo de los Autopilotos | 8 |
| 1.4.3 ESTACIONES DE CONTROL EN TIERRA..... | 9 |
| 1.4.3.1 QGroundControl..... | 9 |
| 1.4.3.2 Mission Planner | 10 |
| 1.4.3.3 UgCS..... | 11 |
| 2 METODOLOGÍA..... | 13 |
| 2.1 ENSAMBLAJE DE LA RÉPLICA FUNCIONAL..... | 13 |
| 2.1.1 DISTRIBUCIÓN MECÁNICA Y ELECTRÓNICA DE LOS COMPONENTES 13 | |
| 2.1.1.1 Estructura mecánica | 13 |
| 2.1.1.2 Estructura Electrónica..... | 15 |
| 2.1.3 MONTAJE SOBRE EL FRAME E INTEGRACIÓN FINAL | 16 |
| 2.2 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE UN FIRMWARE ALTERNATIVO Y ESTACIÓN DE CONTROL..... | 19 |
| 2.3 OPCIÓN ORIGINAL: ARDUPILOT + MISSION PLANNER | 21 |
| 2.3.1 INSTALACIÓN DEL FIRMWARE | 21 |
| 2.3.2 CALIBRACIONES Y CONFIGURACIONES | 23 |
| 2.3.2.1. Sik Radio | 23 |

| | |
|--|----|
| 2.3.2.2. Acelerómetro | 24 |
| 2.3.2.3. Radio Control..... | 25 |
| 2.3.2.4. ESCs | 26 |
| 2.3.2.5. Modos de Vuelo | 26 |
| 2.3.2.6. Test de Motores..... | 27 |
| 2.3.2.7. Monitor de Batería | 28 |
| 2.3.2.8. Initial Tune Parameter..... | 28 |
| 2.3.3 PARÁMETROS | 29 |
| 2.4 OPCIÓN ALTERNATIVA: PX4 + QGROUNDCONTROL | 30 |
| 2.4.1 INSTALACIÓN DEL FIRMWARE | 30 |
| 2.4.2 CALIBRACIONES Y CONFIGURACIONES | 33 |
| 2.4.2.1 Sensores | 33 |
| 2.4.2.2 Radio Control..... | 35 |
| 2.4.2.3 Modos de vuelo | 37 |
| 2.4.2.4 Calibración Alimentación y ESCs..... | 37 |
| 2.4.2.5 Motores..... | 38 |
| 2.4.2.6 Sección de Seguridad..... | 39 |
| 2.4.3 PARÁMETROS | 40 |
| 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 41 |
| 3.1 PRUEBAS Y RESULTADOS..... | 41 |
| 3.1.1 PRUEBAS MANUALES..... | 42 |
| 3.1.2 MISIÓN DE VUELO AUTÓNOMO: ARDUPILOT Y MISSION PLANNER..... | 45 |
| 3.1.3 MISIÓN DE VUELO AUTÓNOMO: PX4 Y QGROUNDCONTROL | 50 |
| 3.1.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS..... | 55 |
| 3.1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS | 57 |
| 3.2 CONCLUSIONES | 59 |
| 3.3 RECOMENDACIONES | 61 |
| 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |
| 5 ANEXOS | 66 |
| ANEXO I. Misiones S Digital: ArduPilot + Mission Planner | 67 |
| ANEXO II. Misiones S Digital: PX4 + QGroundControl | 70 |
| ANEXO III. Misión Triángulo..... | 73 |
| ANEXO IV. Enlaces..... | 78 |

RESUMEN

Dado las diferentes aplicaciones con UAVs que se realizan en el proyecto de investigación PIM-21-01: “Desarrollo de una metodología de monitoreo de emisiones volcánicas y evaluación geomorfológica para el volcán Reventador mediante vehículos aéreos no tripulados (UAVs) de ala fija con sistemas de propulsión eléctrica distribuida (eDP) para despegue y aterrizaje vertical (VTOL)”, se vio la necesidad de probar otra combinación de autopiloto (firmware) y estación base que garantice un sistema confiable para realizar monitoreo aéreo remoto. En el presente Trabajo de Integración Curricular se realiza la selección, instalación y configuración de un firmware alternativo para un cuadricóptero. Previo a esto se realiza el estudio de las características físicas del UAV tipo multicóptero utilizado en el proyecto, así como los distintos firmwares compatibles con su autopiloto, y las posibles estaciones de control a emplearse. Mediante un análisis comparativo se selecciona una alternativa de firmware + estación de control. Con el fin de comparar de forma adecuada la opción previamente utilizada con la alternativa seleccionada se implementa un cuadricóptero réplica, idéntico al utilizado en el proyecto de investigación, con las adaptaciones necesarias para utilizar dos autopilotos en el mismo. Se realizaron misiones de vuelo manuales, así como automáticas con trayectorias predefinidas en misiones de vuelo equivalentes para contrastar el comportamiento y desempeño entre la alternativa y la que se venía empleando.

PALABRAS CLAVE: PX4, ArduPilot, QgroundControl, Mission Planner, UAV Multirotor

ABSTRACT

Considering the diverse range of applications of UAVs within the research project PIM-21-01: "Development of a Methodology for Monitoring Volcanic Emissions and Geomorphological Assessment for the Volcano *Reventador* using Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Electric Distributed Propulsion (eDP) for Vertical Takeoff and Landing (VTOL)", it became imperative to test an alternative combination of autopilot firmware and ground control station to ensure a reliable system for remote aerial monitoring. Therefore, the principal aim of this project involves the selection, installation, and configuration of an alternative firmware for a quadcopter. Beforehand, an exhaustive examination is carried out concerning the physical attributes of the multicopter-type UAV used in the project, alongside an evaluation of the diverse firmware options compatible with its autopilot, and an analysis of potential ground control stations. Through a comparative analysis, an alternative firmware + ground control station is selected. In order to appropriately compare the previously used option with the selected alternative, a duplicate quadcopter is assembled. It is identical to the one used in the research project with requisite modifications to accommodate the simultaneous operation of two autopilots. A series of manual flight missions are executed, alongside automated flights following predetermined trajectories in similar flight scenarios, aiming to discern and contrast the behavior and performance disparities between the new possible option and the one that was normally used.

KEYWORDS: PX4, ArduPilot, QgroundControl, Mission Planner, UAV Multirotor

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) ha aumentado con rapidez a lo largo de la última década, y como consecuencia se observa su creciente integración en una gran variedad de industrias [1] [2]. Actualmente las aplicaciones en las que se emplean UAVs requieren realizar misiones en entornos con condiciones desfavorables, tal como ocurre con el proyecto de investigación interno de la Escuela Politécnica Nacional PIM-21-01, en el cual se emplean drones para, mediante monitoreo aéreo remoto, obtener información de volcanes activos y ecosistemas altoandinos [3]. Dado el costo y tiempo invertidos en los recursos del proyecto, es imprescindible obtener un UAV que tenga un sistema confiable de control que permita realizar el pilotaje a distancia de manera adecuada, para lo cual, uno de los aspectos importantes es el firmware del autopiloto elegido.

En el proyecto de investigación mencionado se dispone de un cuadricóptero que utiliza el software de piloto automático Ardupilot y como respectiva estación de control en tierra a la aplicación Mission Planner. Sin embargo, no se ha realizado todavía un estudio de otras alternativas de software de control para su autopiloto, por lo que no ha sido posible establecer con seguridad el tipo de firmware que permite al dron alcanzar una eficiencia adecuada durante sus misiones de vuelo y evitar posibles errores que afecten a la integridad de la plataforma aérea y de la misión. Además, el cuadricóptero empleado no se encuentra en las mejores condiciones físicas, debido a colisiones en varias misiones de vuelo, por lo que resulta necesario contar con una réplica funcional del mismo, teniendo como controlador de vuelo un Pixhawk Cube 2.1 desarrollado por la empresa CubePilot [4, 5]

Adicionalmente, en base a diferentes pruebas realizadas se ha visto la necesidad de estudiar alternativas en cuanto al firmware de control de vuelo del autopiloto con el que cuenta la aeronave, de modo de considerar plataformas que potencialmente otorguen mayores prestaciones y solventen inconvenientes que se presentaban con su configuración antigua. Entre estos inconvenientes se encuentran errores de orientación y cambios en el modo de vuelo elegido, lo cual puede llevar a accidentes. Por lo tanto, resulta necesario realizar un estudio en el cual se pueda comparar un nuevo firmware de autopiloto con el que se está utilizando, de modo que se establezca la mejor opción que permita disminuir el riesgo de colisión y evitar posibles daños físicos del UAV, que podrían retrasar la realización de una nueva misión hasta repararlo.

Gracias a este trabajo, se cuenta con una réplica funcional del cuadricóptero que se venía utilizando en el proyecto de investigación, para la cual se realizó la selección e instalación de un firmware alternativo para el controlador de vuelo Pixhawk Cube y de la correspondiente aplicación de software para su estación de control en tierra. A partir de ello se realizaron las configuraciones necesarias para pilotear al dron, garantizando el cumplimiento de misiones de vuelo con el dron replicado. Además, a través de la aplicación de estación de control alternativa, se realizó la instalación del firmware seleccionado en el controlador de vuelo Pixhawk Cube. Finalmente, se comprueba el funcionamiento de la plataforma aérea replicada, mediante las misiones de vuelo realizadas cargando Ardupilot y empleando Mission Planner en su estación de control en tierra, y cargando el firmware alternativo para el controlador de vuelo junto con la aplicación de software seleccionada para la estación en tierra. Además, se presentarán las ventajas y desventajas del uso de la opción alternativa frente a la utilizada anteriormente.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Seleccionar, instalar, configurar y comprobar el funcionamiento de un firmware dedicado para el control de vuelo de una plataforma aérea no tripulada tipo Quad-rotor.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar acerca de firmwares de código abierto y de softwares de aplicación de estaciones de control en tierra, así como de sus requerimientos a nivel de hardware y software para su instalación en el sistema de control de vuelo integrado del cuadricóptero disponible como parte del proyecto de investigación PIM-21-01.
2. Integrar y ensamblar tanto del componente mecánico como electrónico para contar con una réplica del cuadricóptero, en base a las características de la plataforma utilizada previamente en el proyecto de investigación.
3. Seleccionar el firmware más adecuado para el controlador de vuelo integrado en el cuadricóptero replicado, así como de la respectiva estación de control en tierra compatible con el firmware seleccionado y que disponga configuraciones para el frame tipo Quad-rotor.
4. Realizar la configuración de los parámetros requeridos por el firmware de control de vuelo en base a las características del cuadricóptero replicado, con la ayuda del software de aplicación seleccionado para la estación de control en tierra.

5. Ejecutar misiones de vuelo equivalentes empleando tanto el software de control previamente instalado, Ardupilot con su estación de control Mission Planner, como con el firmware alternativo con la aplicación seleccionada como estación de control en tierra.

1.3 ALCANCE

- Se revisa la documentación correspondiente de la plataforma aérea tipo Quad-rotor o cuadricóptero disponible dentro del proyecto de investigación PIM-21-01, y se verifica la disponibilidad y correcto funcionamiento de todos los elementos necesarios para su integración.
- Se integra y ensambla la estructura tanto mecánica como electrónica de la réplica del cuadricóptero en base a las características de la plataforma utilizada previamente en el proyecto de investigación.
- Se realiza una revisión bibliográfica acerca de firmwares de código abierto y de softwares de aplicación de estaciones de control en tierra, así como de sus requerimientos a nivel de hardware y software para su instalación en el sistema de control de vuelo del cuadricóptero replicado.
- Se selecciona un firmware alternativo a Ardupilot para el autopiloto integrado en el cuadricóptero replicado que permita: el control asistido de la plataforma aérea, la ejecución de misiones de vuelo, y que soporte un sistema de telemetría para la comunicación con una estación en tierra.
- Se selecciona e instala la aplicación de software de la estación de control en tierra alternativa a Mission Planner y compatible con el autopiloto integrado en el cuadricóptero replicado, y que disponga de configuraciones para el frame tipo Quad-rotor.
- Se instala el firmware Ardupilot en el controlador de vuelo del cuadricóptero replicado mediante la aplicación de la estación de control en tierra Mission Planner, y se realiza la configuración de parámetros en base a las características de la plataforma aérea a emplear.
- Se instala el firmware alternativo en el controlador de vuelo del cuadricóptero replicado mediante la aplicación de la estación de control en tierra seleccionada, y se realiza la

configuración de parámetros en base a las características de la plataforma aérea a emplear.

- Se realizan las pruebas iniciales del funcionamiento del software de control de vuelo en base a la ejecución de trayectorias sencillas con el fin de comprobar y modificar, de ser el caso, la configuración de parámetros requeridos por el sistema de control de vuelo.
- Se ejecutan misiones de vuelo empleando el firmware anteriormente instalado Ardupilot con su estación de control Mission Planner, y el firmware seleccionado con su respectiva estación de control en tierra, a fin de contrastar el desempeño del sistema de control de vuelo con la propuesta alternativa de software de piloto automático.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 PLATAFORMA AÉREA A UTILIZAR

Dentro del proyecto de investigación PIM-21-01 “Desarrollo de una metodología de monitoreo de emisiones volcánicas y evaluación geomorfológica para el volcán Reventador mediante vehículos aéreos no tripulados (UAVs) de ala fija con sistemas de propulsión eléctrica distribuida (eDP) para despegue y aterrizaje vertical (VTOL)” [3] se consideran dos plataformas de vuelo no tripuladas. Estas son un UAV de ala fija y un Quad-copter, este último es el que se utilizará en este trabajo de integración curricular.

1.4.1.1 Quad-rotor del proyecto de investigación PIM-21-01

En [6] se explica a detalle la implementación física del cuadricóptero utilizado en el proyecto de investigación PIM-21-01, para el cual se emplea el airframe tipo F450 que incluye tanto la estructura del dron como una placa para realizar las conexiones eléctricas de los motores y la alimentación. El UAV mencionado se puede observar en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Estructura física del cuadricóptero [Fuente propia]

Entre los componentes principales de este cuadricóptero se encuentran [6]:

- Controlador de vuelo: Pixhawk Cube 2.1
- GPS: Módulo Here 2
- Transreceptor: RFD900+
- Receptor FlySky FS – IA10B
- Motores: A2212/13T
- Controladores de Velocidad ESC de 30ª
- Propelas 1045
- Batería + Power Brick Mini (Regulador de voltaje)

Entre los elementos mencionados, el Pixhawk Cube 2.1 es el encargado de gestionar y controlar el vuelo del Quad-copter, para lo cual es necesaria la instalación de un firmware compatible con el airframe del UAV disponible, y adicionalmente el contar con una estación de control a tierra

1.4.1.2 Hardware – Controlador de Vuelo

El controlador de vuelo Pixhawk Cube 2.1 que se muestra en la Figura 1.2 es un piloto automático flexible destinado principalmente a los fabricantes de sistemas comerciales. Está diseñado para usarse con una placa portadora de dominio específico para reducir el cableado, mejorar la confiabilidad y facilitar el ensamblaje [4].



Figura 1.2. Controlador de vuelo Pixhawk Cube 2.1 (Black) [4]

A continuación, se explican las especificaciones principales del controlador de vuelo mencionado:

Procesador [7]

- Posee un Núcleo ARM Cortex STM32F427 de 32-bits con FPU, de 168 Mhz de frecuencia, 256 KB de RAM, 2 MB de Flash. Además, tiene un Co-procesador de seguridad STM32F103 de 32-bit

Sensores [7]

- Dispone de tres IMUs redundantes (acelerómetros, giróscopos y brújulas) y dos barómetros MS5611 redundantes. Además, como IMU de respaldo para acelerómetro y giroscopio tiene ST Micro L3GD20+LSM303D o InvenSense ICM2076xx.
- InvenSense MPU9250, ICM20948 y/o ICM20648 como primera y tercera IMU (acelerómetro y giróscopo)

Energía [7]

- Tiene una fuente de alimentación redundante con conmutación automática, un carril de servo de 7V para alta potencia. Además, todas las salidas periféricas están protegidas contra sobrecorriente y todas las entradas protegidas contra descargas electrostáticas.

Interfaces [7]

- 14 salidas de servo PWM y salida de servo S.Bus
- Entradas R/C para CPPM, Spektrum / DSM y S.Bus, y entrada RSSI analógica / PWM. Entradas analógicas (3,3 V y 6,6 V)
- Puertos I2C, SPI y CAN Bus

Por otro lado, en la Figura 1.3. se observan los puertos del controlador de vuelo Pixhawk Cube 2.1:

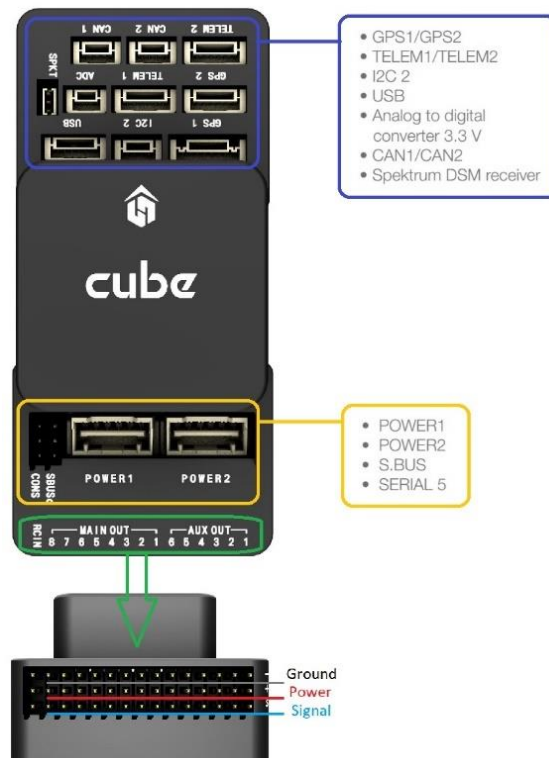


Figura 1.3. Puertos del controlador de vuelo Pixhawk Cube 2.1 [4]

1.4.2 SOFTWARE DE PILOTO AUTOMÁTICO

Un piloto automático permite el control de un vehículo autónomo pilotado a distancia, en el que los usuarios pueden realizar las configuraciones y adaptaciones según sus propios requisitos. Los firmwares que de acuerdo con Holybro, el fabricante de Pixhawk Cube, son compatibles con el controlador de vuelo presentado en la Figura 1.3, son PX4 y ArduPilot [5]. Esto con el fin de garantizar el correcto funcionamiento, sin embargo, también se pueden usar otras opciones, aunque no se garantiza que sean completamente compatibles con el controlador de vuelo Pixhawk Cube. Entre estas opciones se encuentra TauLabs, un firmware de código abierto que se puede utilizar para controlar drones y otros vehículos aéreos no tripulados (UAV) [8]. En comparación con PX4 y ArduPilot su documentación y recursos son limitados, y su comunidad de usuarios es pequeña [8]. Posee su propia estación terrestre TauLabs GCS, con una interfaz desactualizada y poco intuitiva. Además, aunque se pueda cargar este firmware en el controlador de vuelo Pixhawk Cube, no se garantiza que sean compatibles o un correcto funcionamiento.

Como resultado, de acuerdo con Holybro usar un firmware diferente a ArduPilot o PX4 podría ocasionar problemas de compatibilidad. Además, dado los recursos limitados y su

estación de control desactualizada, TauLabs no resulta el firmware más recomendable para el controlador de vuelo Pixhawk Cube. A continuación, se presentarán los softwares de piloto automático recomendados.

1.4.2.1 PX4

PX4 es un software de control de vuelo de código abierto para drones y otros vehículos no tripulados desarrollado a partir del 2009. Está alojado en Dronecode, una organización sin fines de lucro de Linux Foundation. Posee licencia BSD, es decir que las personas que modifican y luego venden PX4 no están obligadas a hacer públicas sus modificaciones [9]. PX4 soporta diferentes tipos de Aiframes de UAVs como por ejemplo: Airship, Autogyro, Balloon, Copter, Plane, VTOL, etc [10, 11]. Un UAV tipo Multicopter tiene 12 modos de vuelo incorporados en PX4 que se detallan en [12], de los cuales los más utilizados se resumen en la Tabla 1.1.

1.4.2.2 ArduPilot

ArduPilot es un software de control de vuelo de código abierto desarrollado para muchos tipos de vehículos a partir del 2007. Posee licencia GPL, es decir que las personas que desarrollan sus proyectos en Ardupilot, están obligadas a distribuir sus modificaciones y código fuente [13]. Además, Ardupilot soporta diferentes tipos de Aiframes de UAVs como por ejemplo: Quadcopter, HexaCopter, Dodeca-HexaCopter, OctaCopter, QueadX8, TriCopter, etc [14]. Un UAV tipo Copter tiene 25 modos de vuelo incorporados en ArduPilot que se explican en [15], de los cuales los más utilizados se presentan en la Tabla 1.1.

1.4.2.3 Tabla Comparativa de modos de vuelo de los Autopilotos

Los modos de vuelo se pueden seleccionar a través de interruptores del radio control, o mediante comandos de misión o comandos desde una estación terrestre (GCS) o una computadora complementaria [12]. En la Tabla 1.1. se presentan los modos de vuelo disponibles y equivalentes entre PX4 y ArduPilot para vehículos aéreos tipo cuadricóptero.

Tabla 1.1. Modos de Vuelo para cuadricóptero en PX4 y ArduPilot [12, 15]

| PX4 | | ARDUPILOT | |
|---------|---|-----------|--|
| Modo | Descripción | Modo | Descripción |
| Hold | El vehículo flota en la posición GPS y altitud actuales | Alt Hold | Mantiene la altitud y nivela automáticamente el roll y pitch |
| Mission | Ejecuta misiones predefinidas | Auto | Ejecuta misiones predefinidas |

| | | | |
|-------------------|--|-----------|--|
| Guided | Navega a coordenadas simples con una estación de control | Guided | Navega a coordenadas individuales mediante una estación de control |
| Position | Tiene estabilización de altitud donde las palancas centradas nivelan al vehículo y lo mantienen en altitud y posición fija en contra del viento. | Loiter | Mantiene la altitud y posición, y usa el GPS para realizar los movimientos |
| Return | El vehículo sigue un camino despejado hacia un lugar seguro | RTL | Regresa por encima del lugar de despegue, y puede incluir aterrizaje |
| Manual Stabilized | Modo RC donde las palancas centradas nivelan el vehículo (solo - la posición no está estabilizada). | Stabilize | Nivela automáticamente el eje de roll y pitch |

1.4.3 ESTACIONES DE CONTROL EN TIERRA

Una estación de control de tierra (Ground Control Station) es un software de aplicación que se ejecuta en un dispositivo y permite instalar el firmware para el controlador de vuelo, configurar parámetros, realizar la calibración de sensores y controlar el dron de forma remota. También muestra datos de telemetría, la posición del dron en un mapa mediante ubicación en GPS, y transmisiones de video en vivo.

Las estaciones de control terrestres recomendadas para los firmwares PX4 y Ardupilot, son QGroundControl y Mission Planner. Aunque también existen otras opciones, como por ejemplo UgCs, una estación de control terrestre compatible con Pixhawk que ofrece una interfaz avanzada y funciones dirigidas a usuarios experimentados, siendo su principal inconveniente que requiere una licencia de pago para su uso [16, 17].

1.4.3.1 QGroundControl

QGroundControl es una estación de control en tierra de código abierto que proporciona un control total de vuelo y configuración para vehículos de distintos tipos como UAVs, VTOL, ala fija, entre otros, equipados con firmware PX4 o ArduPilot. Además, posee una interfaz de usuario intuitiva y fácil de usar que resulta ideal para usuarios principiantes, y que al mismo tiempo brinda funciones más complejas para usuarios experimentados [18]. En la Figura 1.4 se puede observar la interfaz de QGroundControl.



Figura 1.4. QGroundControl [18]

Entre sus principales características están:

- Configuración de vehículos motorizados con ArduPilot y PX4 Pro.
- Soporte de vuelo para vehículos con PX4 y ArduPilot
- Planificación de misiones para vuelos autónomos.
- Pantalla de mapa de vuelo que muestra la posición del vehículo, la ruta de vuelo, los puntos de ruta y los instrumentos del vehículo.
- Es compatible con los sistemas operativos Windows, OS X, plataformas Linux, dispositivos iOS y Android.

1.4.3.2 Mission Planner

Mission Planner es una estación de control en tierra con una amplia variedad de características y funcionalidades para el control de vuelo de vehículos autónomos aéreos, terrestres o acuáticos que utilizan el firmware ArduPilot. Además, forma parte del proyecto de piloto automático de código abierto Ardupilot mencionado en la Sección 1.4.2.2.

Mission Planner solo tiene compatibilidad con el sistema operativo Windows, y puede utilizarse como una herramienta de configuración o como un complemento de control dinámico para vehículos autónomos [19, 20]. A continuación, en la Figura 1.5. se puede observar la interfaz de Mission Planner:

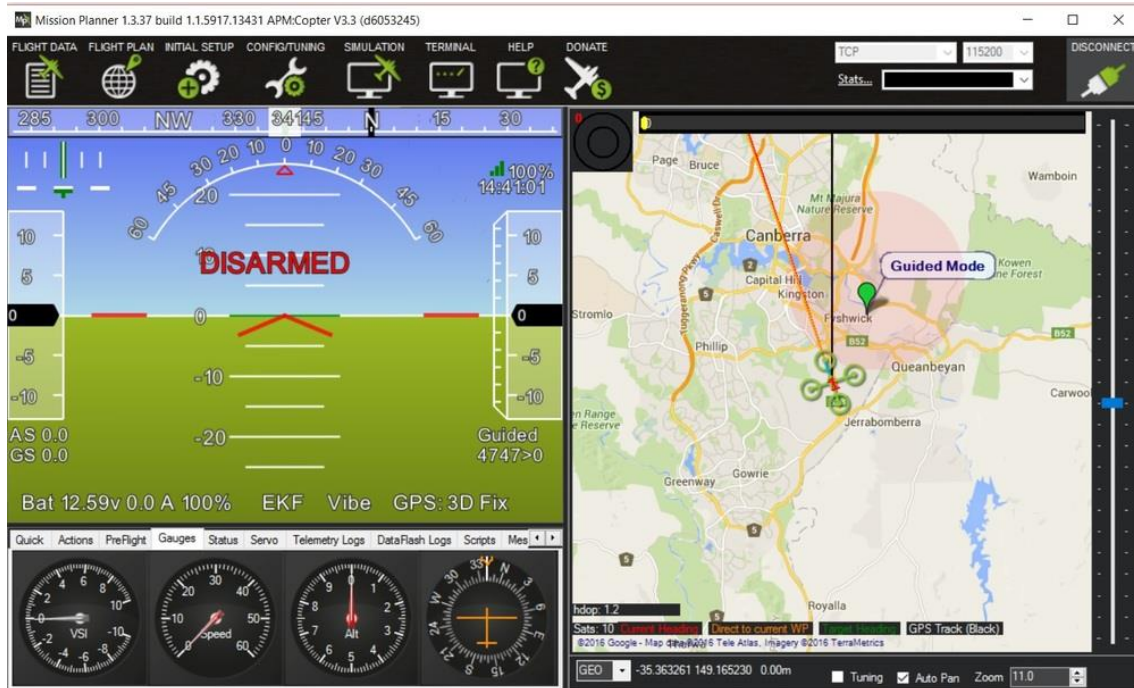


Figura 1.5. Mission Planner [20]

Entre las funcionalidades de Mission Planner están [19] [20]:

- Utilizando una variedad de opciones de mapas, como Google Maps, Bing, Open Street Maps y Custom WMS, es posible introducir puntos de trayectoria, cercos y puntos de reunión con un solo clic.
- Se pueden elegir comandos de misión de una lista desplegable.
- Es posible descargar los archivos de registro de la misión para poder analizarlos.
- Se pueden personalizar los ajustes del piloto automático para el UAV.
- Hay una interfaz con un simulador de vuelo de PC que permite crear un simulador de UAV completo que utiliza el software-en-bucle (Software in the Loop o SITL por sus siglas en inglés).

1.4.3.3 UgCS

UgCS (Universal Ground Control Software) es un software de planificación y control de misiones vuelo realizadas por UAVs de una gran variedad de fabricantes [16]. Posee compatibilidad con los sistemas operativos Windows, Mac OS X Maverick 10.9 o posterior, y Linux. Además, requiere de una tarjeta gráfica para su correcto funcionamiento. puede utilizarse como una herramienta de configuración o como un complemento de control

dinámico para vehículos autónomos [21]. La interfaz de UgCS se muestra en la Figura 1.6 que se muestra a continuación:



Figura 1.6. UgCS [16]

UgCS es la mejor opción para la topografía de grandes áreas debido a sus múltiples características [17]:

- Planificación automatizada de misiones de drones
- Herramientas de fotogrametría y geoetiquetado
- Personalización del mapa utilizando un modelo de elevación digital (DEM) e importando archivos kml
- Cambio de batería para misiones extensas

Además, UgCS tiene compatibilidad con drones de diferentes fabricantes entre ellos: drones DJI; Serie Autel EVO II; Freely Alta X; Ardupilot, Px4 y otros multirrotores, alas fijas y VTOL compatibles con MAVLink [17]. Sus licencias van desde los €790.00 hasta los €2,190.00 por usuario y se pueden encontrar de manera más detallada en [21]. La licencia más sencilla es “UgCS PRO perpetua”, dirigida a pilotos profesionales de drones.

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los pasos realizados para desarrollar el componente propuesto para este Trabajo de Integración Curricular, tomando como base los conceptos teóricos establecidos en el primer capítulo. La información recolectada proviene de: artículos científicos, revistas científicas, repositorios virtuales, etc.

2.1 ENSAMBLAJE DE LA RÉPLICA FUNCIONAL

Como se explicó en la Introducción del Capítulo 1 de este Trabajo de Integración Curricular, se realiza una réplica funcional del UAV tipo Quad-rotor que se venía utilizando para el proyecto de investigación PIM-21-01, dado que debido a colisiones en varias misiones no se encontraba en las mejores condiciones físicas, y por lo tanto no estaba habilitado para volar. Como antecedente, se debe tener en cuenta que, para todas sus misiones, el cuadricóptero original utilizaba el software de piloto automático ArduPilot, con su respectiva estación de control Mission Planner, por lo que esta opción original se mantiene para realizar la comparación con la opción alternativa.

2.1.1 DISTRIBUCIÓN MECÁNICA Y ELECTRÓNICA DE LOS COMPONENTES

La integración física del cuadricóptero réplica se realiza de acuerdo con la explicación que se encuentra en [6], donde se detallan los elementos mecánicos y electrónicos del cuadricóptero original del proyecto de investigación PIM-21-01. La principal diferencia es que en el presente TIC se vio la necesidad de utilizar dos controladores de vuelo Pixhawk Cube 2.1. en el que se instalen en el primero el Firmware ArduPilot y en el segundo el Firmware alternativo, y que cada uno sea configurado mediante las respectivas estaciones de control en tierra. Esto debido a que los componentes del cuadricóptero deben mantenerse en una posición fija para realizar las calibraciones necesarias, y evitar la dificultad de instalar nuevamente el firmware cuando se desee realizar una misión con otra de las opciones mencionadas.

2.1.1.1 Estructura mecánica

La estructura mecánica del cuadricóptero réplica se basa en el marco (frame) F450 mencionado en la Sección 1.4.1. y que se muestra en la Figura 2.1. Este marco proporciona una estructura resistente y liviana para el montaje de los componentes que integran el UAV, y está compuesto por brazos en forma de X que se extienden desde el centro.



Figura 2.1. Frame F450 del cuadricóptero [Fuente propia]

Adicional, dentro de la estructura mecánica del cuadricóptero réplica, se realiza el diseño de la base en 3D que se muestra en la Figura 2.2, cuyo objetivo principal es proteger al controlador de vuelo que se encontrará ubicado en la parte superior del frame F450. El diseño de la base se realiza en el software AutoCAD 2D y 3D, de tal manera que se adapte al tamaño y forma del controlador de vuelo Pixhawk Cube 2.1 para un ajuste adecuado.

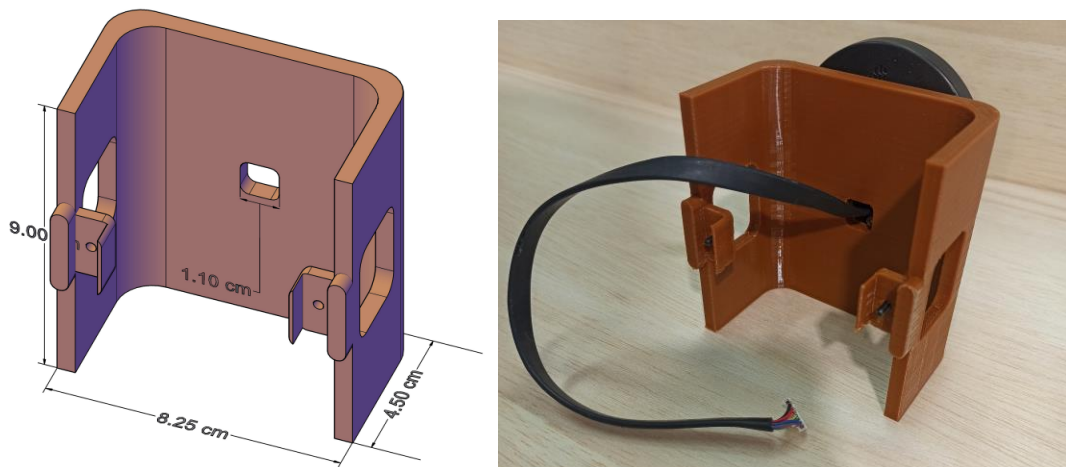


Figura 2.2. Base 3D para protección del controlador de vuelo [Fuente propia]

Como se puede observar, la base tiene una forma rectangular abierta que facilita la conexión de los distintos elementos, y posee bordes redondeados para darle más firmeza. Además, se realizan dos aberturas a los lados que permiten el acceso al puerto micro USB del controlador de vuelo. Adicionalmente, posee una abertura en la parte superior que permite pasar el cable del GPS y ubicarlo correctamente totalmente horizontal.

Posterior al diseño, se realiza la impresión de la base en 3D para lo cual se utiliza un rollo de filamento PETG (Tereftalato de PoliEtileno modificado por Glicol), el cual es un material

que tiene mayor adhesión, durabilidad, resistencia a la luz ultravioleta y resistencia a altas temperaturas en comparación con otros filamentos como el PLA (ácido poliláctico) [22]. La base impresa en 3D se debe montar sobre la estructura mecánica del cuadricóptero, asegurándola con tornillos que ingresan por las ranuras realizadas para ese fin. Así se asegura que, en caso de impactos o daños durante el vuelo, se proteja al controlador que esté en la parte superior.

2.1.1.2 Estructura Electrónica

La elección de la ubicación de los componentes en el marco puede variar en función del criterio único de quien ensamble el cuadricóptero. A continuación, se explicará la interconexión electrónica de los elementos y posteriormente su montaje sobre el Frame.

En la Figura 2.3. se presenta un diagrama donde se puede observar la interconexión de los elementos que conforman el cuadricóptero con el controlador de vuelo Pixhawk Cube Black. Se presenta de forma gráfica y detallada los puertos específicos a los que debe ir conectado cada uno de los elementos necesarios para el funcionamiento del cuadricóptero, asegurando su control a distancia por telemetría, mediante la estación de control en tierra, o con ayuda del radio control.



Figura 2.3. Diagrama de interconexión de elementos con Pixhawk Cube [Fuente propia]

Los elementos que se presentan son los siguientes:

1. Módulo GPS Here 2
2. Sistema de Telemetría RFD900+
3. Radio Control + Receptor de Radio FlySky FS-IA10B
4. Motores (x4) A2212/13T – 1000KV
5. Propelas 1045
6. Controladores de velocidad (ESC x4) de 30[A]
7. Power Brick Mini
8. Batería LiPO de 3 celdas – 11.1V – 5200mA

2.1.3 MONTAJE SOBRE EL FRAME E INTEGRACIÓN FINAL

A continuación, se explicarán los pasos a seguir para realizar el montaje de los elementos del cuadricóptero sobre el frame. En primer lugar, se arma el marco del UAV que se mostró en la Figura 2.1. sobre el cual se colocarán los distintos dispositivos. Como segundo paso se coloca un motor en el extremo de cada brazo del frame, los cuales a su vez van soldados a su respectivo controlador de velocidad. Posteriormente, se procede a soldar los terminales de los ESCs en la placa inferior del marco como se muestra en la Figura 2.4. Como se observa, se realiza un acercamiento a la placa inferior del frame de modo que sea posible visualizar a detalle la soldadura realizada.

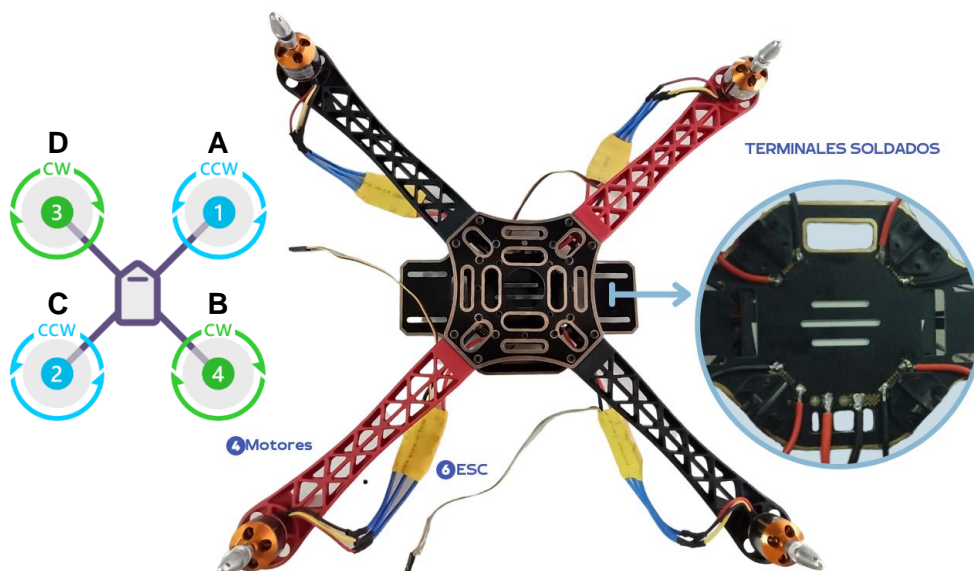


Figura 2.4. Ubicación y sentido de giro de motores & soldadura de ESCs [Fuente propia]

Los motores deben soldarse a los ESCs de tal manera que giren en el sentido que se muestra en la Figura 2.4, para ello es necesario verificar el sentido de giro ya sea manualmente o desde la estación de control en Tierra. Se sujetan los ESCs a la parte inferior de los brazos del frame, y se procede a soldar los terminales positivo y negativo del Power Brick Mini a la placa inferior, de igual manera que en el paso anterior, como se observa en la Figura 2.5.

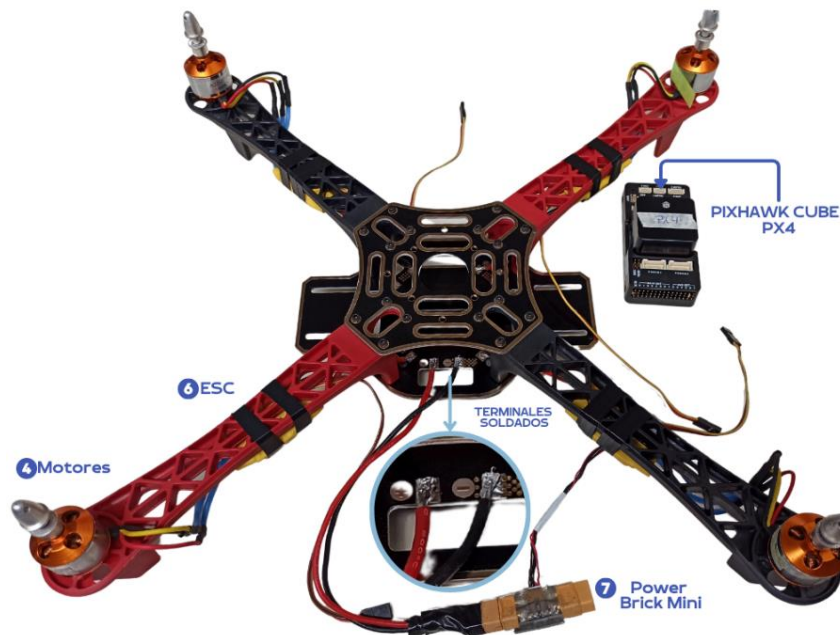


Figura 2.5. Ubicación de ESCs y soldadura de Power Brick Mini [Fuente propia]

Posteriormente en la Figura 2.6. se muestra la ubicación de los elementos restantes de la lista de la Sección 2.1.1.2. desde una vista general, frontal y posterior. Estos elementos son: (1) GPS, (2) Modem de Telemetría RFD900+, (3) Receptor de Radio FlySky FS-IA10B, (5) Propelas 1045, (7) Power Brick Mini, (8) Batería LiPO.

Se observa que los controladores de vuelo se instalan en una posición central. El primero (ArduPilot) dentro del marco del UAV, el segundo (Firmware Alternativo) en la parte superior del marco, protegido por la base impresa en 3D, y el módulo GPS en la parte superior de dicha base. El modem de telemetría RFD900+ se coloca en uno de los brazos del del cuadricóptero para comunicar el UAV con la estación de control. El receptor de radio Flysky FS-IA10B se ubica en un extremo de la cara inferior del marco del dron sujeto por medio de las aberturas de la placa del frame y permite la comunicación con el radio control.

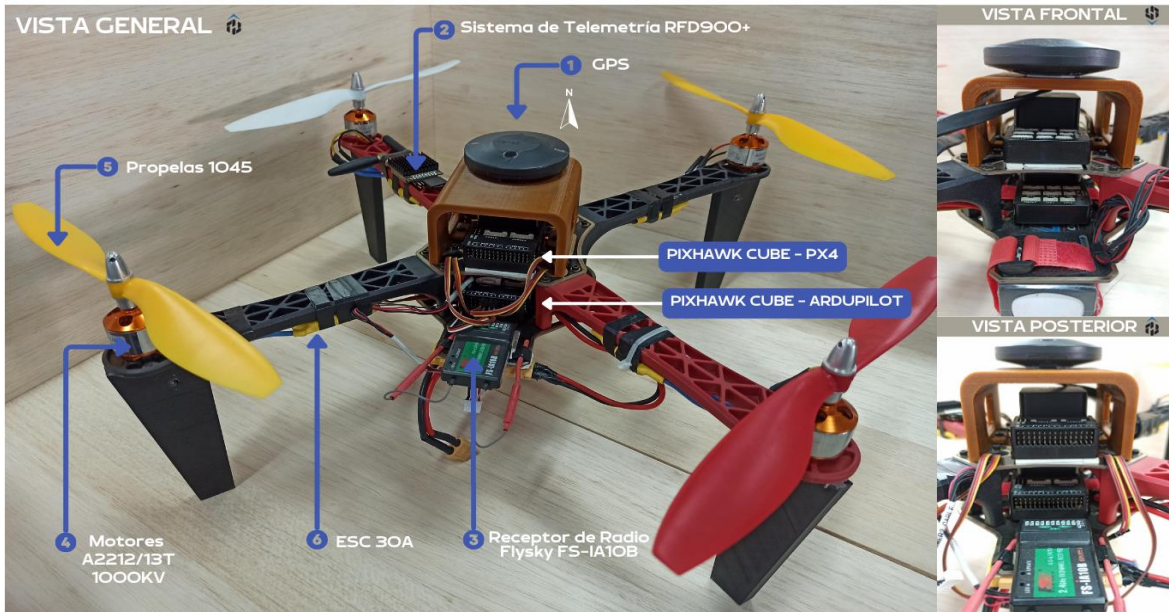


Figura 2.6. Vista General, Frontal y Posterior [Fuente propia]

En la Figura 2.7. se presenta la ubicación de los elementos (7) Power Brick Mini y (8) Batería LiPO. La batería se encuentra en la parte inferior del cuadricóptero, en una posición central y equilibrada, y sujeta mediante correas de velcro. El regulador de voltaje Power Brick Mini se coloca en un extremo de la cara inferior del marco del dron. Además, en la vista lateral se observa la abertura realizada en la base 3D que permite acceder al puerto Micro USB del Pixhawk Cube de la parte superior.



Figura 2.7. Vista Inferior y Lateral de la ubicación de los elementos [Fuente propia]

Finalmente, en la Figura 2.8. se muestra el cuadricóptero completamente integrado con todas sus piezas constitutivas y listo para ser programado y comandado.



Figura 2.8. Cuadricóptero réplica totalmente integrado [Fuente propia]

2.2 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE UN FIRMWARE ALTERNATIVO Y ESTACIÓN DE CONTROL

Como se mencionó en el primer capítulo el cuadricóptero original emplea el firmware ArduPilot y la estación de control Mission Planner. De acuerdo a lo mencionado en la Sección 1.4.2. se analizará la opción alternativa ideal en cuanto a software de control de piloto automático (firmware) y estación de control en tierra. Para ello, se realiza la Tabla 2.1. en la cual se comparan las características más relevantes de los firmwares de acuerdo a la información presentada en la Sección 1.4.2: PX4 de la Sección 1.4.2.1, ArduPilot de la Sección 1.4.2.2 y TauLabs,.

Tabla 2.1. Tabla comparativa de Firmwares

| | PX4 | ArduPilot | TauLabs |
|-----------------------|------------|------------------|----------------|
| Licencia | BSD | GPL | GPL |
| Código Abierto | Sí | Sí | Sí |
| Estabilidad | Alta | Alta | Variable |

| | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Documentación | Variada y actualizada | Amplia, variada y actualizada | Limitada y fuera de desarrollo |
| Comunidad de usuarios | Grande | Grande | Pequeña |
| Estación Terrestre | QgroundControl | Mission Planner QgroundControl | TauLabs GCS (desactualizada) |
| Compatibilidad con UAVs | Amplia gama de aiframes de UAVs | Amplia gama de aiframes de UAVs | Limitada gama de aiframes de UAVs |
| Compatibilidad con Pixhawk Cube | Compatible | Compatible | Cuestionable |

De manera similar, se realiza la Tabla 2.2, en base a la información resumida en la Sección 1.4.3, en la que se realiza una comparación entre las estaciones de control en tierra: QgroundControl, Mission Planner y UgCS, de modo que sea posible establecer sus características de una mejor manera.

Tabla 2.2. Tabla comparativa de estaciones de control en tierra [23]

| | QgroundControl | Mission Planner | UgCS |
|--|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Licencia | Código abierto | Código abierto | Propietario |
| Precio | Gratis | Gratis | Pagado |
| Sistemas Operativos Compatibles | Windows, Linux, Mac OS | Windows | Windows, Linux, Mac OS |
| Interfaz de usuario | Moderna y personalizable | Desactualizada pero funcional | Moderna y personalizable |
| Código fuente | Python/QT | C# | C# |
| Documentación | Limitada | Extensa | Limitada |
| Vuelo autónomo | Sí | Sí | Sí |
| Datos en tiempo real | Sí | Sí | Sí |
| Mapas 2D | Sí | Sí | Sí |
| Mapas 3D | No | No | Sí |
| Arquitectura multi-vehículo | Sí | No | Sí |
| Interfaz intuitiva | Sí | Sí | No |
| Mapas Offline | Sí | Sí | No |
| Firmware | PX4 y Ardupilot | Ardupilot | PX4 y Ardupilot |

Holybro, el fabricante de Pixhawk Cube, menciona en [5] que los firmwares compatibles con el controlador de vuelo Pixhawk Cube 2.1 (Back) son: ArduPilot y PX4. Por lo tanto, pese a que existen otras opciones de firmware como TauLabs, no son las más recomendadas según la sugerencia del fabricante. Además, la estación de control en tierra de Taulabs es poco intuitiva y se encuentra desactualizada, lo que dificulta la realización de pruebas de misiones de vuelo automáticas. Asimismo, no se han realizado actualizaciones importantes en TauLabs desde 2017 [8], lo que sugiere que el desarrollo y el soporte pueden estar limitados.

Para la aplicación de estación de control, se debe considerar una opción compatible con el software de piloto automático elegido previamente. La fundación Dronecode, en la página oficial de PX4 menciona que QgroundControl es un software que permite realizar la configuración de un piloto automático basado en PX4 [24]. A pesar de que UgCs también es una opción de estación de control que soporta PX4, no es la más viable debido a que requiere una licencia de pago para su uso [17] y no es de código abierto.

En resumen, la opción más viable de un firmware compatible con el UAV Quad-rotor réplica y con su controlador de vuelo Pixhawk Cube Black es PX4. Adicionalmente para la estación de control, de acuerdo al análisis realizado en base a las características mencionadas en la Sección 1.4.3, la mejor opción en cuanto a compatibilidad, características y accesibilidad es QgroundControl. Esto, tomando en cuenta que la opción que se venía utilizando anteriormente era ArduPilot + Mission Planner, y la opción alternativa es PX4 + QGroundControl.

2.3 OPCIÓN ORIGINAL: ARDUPILOT + MISSION PLANNER

2.3.1 INSTALACIÓN DEL FIRMWARE

Para la instalación del firmware ArduPilot, se conecta el controlador de vuelo Pixhawk Cube a una computadora por medio de un cable micro USB. En la estación de control Mission Planner, en la ventana de Set Up se selecciona la opción Install Firmware y aparecen diversas opciones de que se pueden cargar, como se observa en la Figura 2.9. Se escoge la opción correspondiente, en este caso Copter V4.3.6 Official.

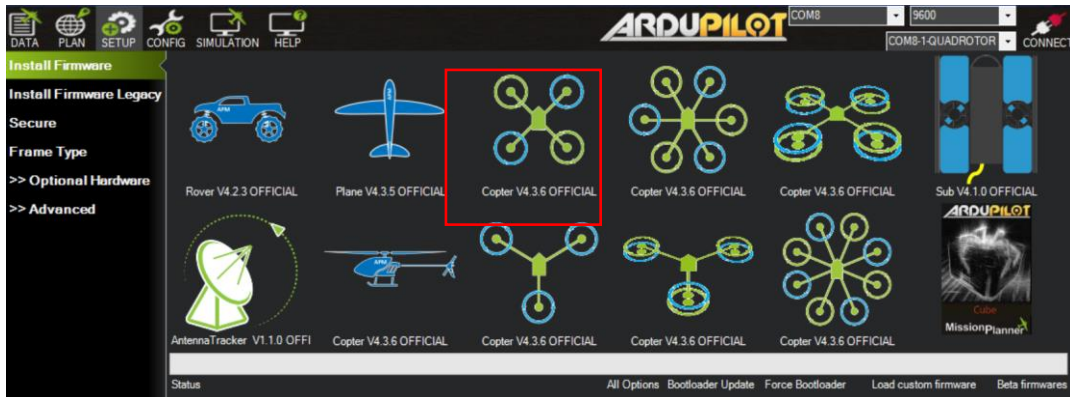


Figura 2.9. Mission Planner Firmware Setup [Fuente propia]

Una vez confirmado que se desea continuar con la instalación, se muestra la ventana de la Figura 2.10, donde se debe elegir el controlador de vuelo a utilizarse (en caso de que no lo detecte automáticamente) y el tipo de firmware que se desea cargar.

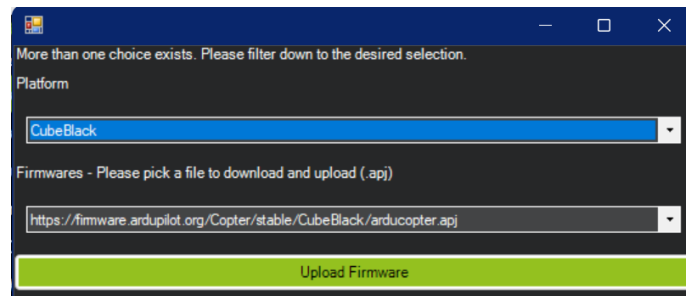


Figura 2.10. Mission Planner Upload Firmware [Fuente propia]

Se selecciona la opción de autopiloto CubeBlack y firmware ArduCopter, y al dar clic en Upload Firmware empieza el proceso como se muestra en la Figura 2.11.

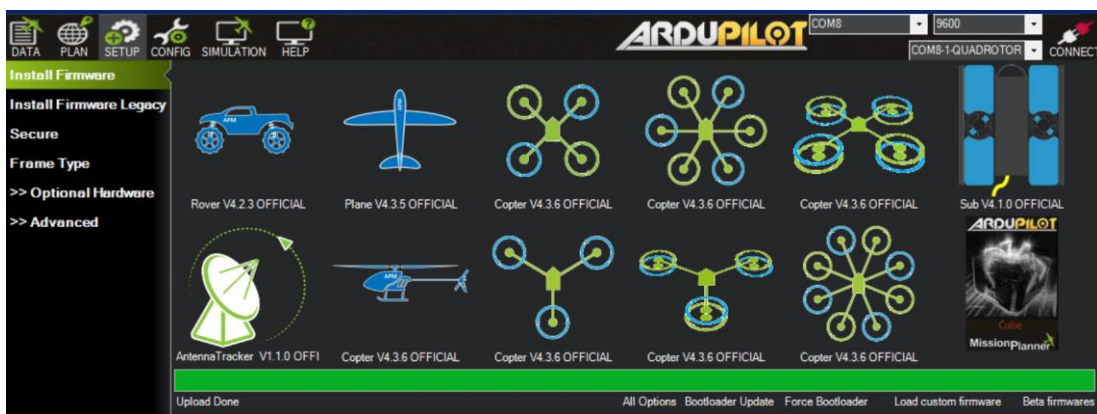


Figura 2.11. Mission Planner Firmware Setup Completo [Fuente propia]

Para finalizar con la instalación, se debe escoger el Airframe adecuado para el Quad-Copter X. En la Figura 2.12. se presenta la ventana de selección del Airframe, donde se

escoge la opción correspondiente a un Quadrotor X, misma que está resaltada mediante el cuadrado rojo colocado en dicha figura.

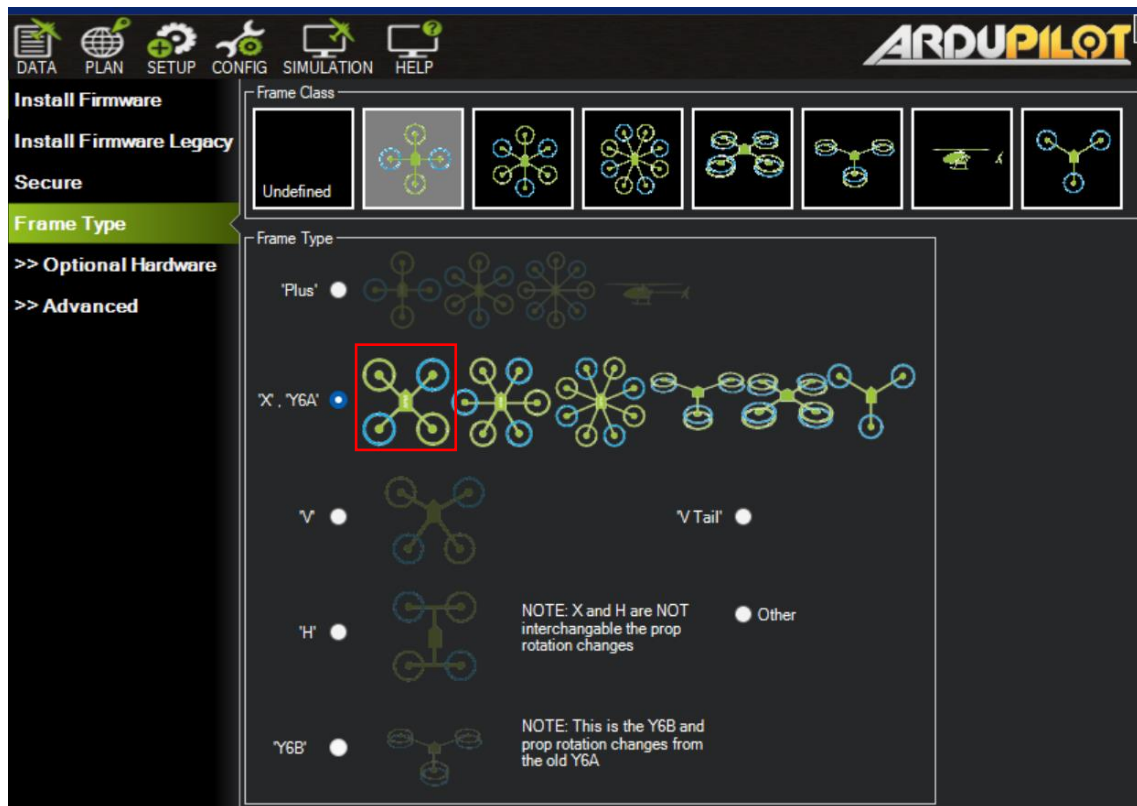


Figura 2.12. Mission Planner Frame Type [Fuente propia]

2.3.2 CALIBRACIONES Y CONFIGURACIONES

2.3.2.1. Sik Radio

Sik Radio es una colección de firmware y herramientas para radios de telemetría, el cual es compatible con el sistema de telemetría RDF900 [25]. Para iniciar la configuración del sistema se debe conectar uno de los módems de telemetría a la computadora usando el cable micro USB. Se conecta la batería al cuadricóptero de modo que se energice el módem de telemetría que se encuentra en el mismo. Posteriormente, en Mission Planner (Figura 2.13) en la esquina superior derecha se debe seleccionar el puerto COM correspondiente al del cuadricóptero y establecer una velocidad de 57600 baudios, sin presionar el botón Conectar (Connect). En la ventana Setup > Optional Hardware > Sik Radio, se presiona el botón Load Settings para cargar la configuración, de modo que la información del área Local y Remota se llena automáticamente con los valores por defecto y con la versión del firmware. Si el UAV va a volar en un área con otros pilotos se debe cambiar el valor del Net ID, que por defecto es 25. En este caso se deja el valor por defecto

y para cargar los valores en el equipo se presiona el botón “Copy required to remote” que se encuentra en la parte inferior, y finalmente para guardar los cambios se presiona “Save Settings” [26]. Justamente en la Figura 2.13 están resaltados mediante números el orden de los pasos indicados anteriormente.



Figura 2.13. Mission Planner Sik Radio [Fuente propia]

Los módems de telemetría RFD900+ tienen 2 LEDs, uno rojo y otro verde. Cuando el verde está parpadeando es porque está buscando otro módem, y si se mantiene encendido es porque está estableciendo conexión con otro módem. Mientras que cuando el rojo parpadea es porque está transmitiendo datos, y cuando se mantiene prendido es porque está en modo de actualización de firmware [26]. Una vez configurado el sistema de telemetría y asegurándose de que hay transmisión de datos, es posible conectarse directamente sin cable USB. Para ello en la esquina superior derecha de Mission Planner se da clic en “Connect”, luego de lo cual el logo respectivo cambia a ver, como se muestra en la Figura 2.14.

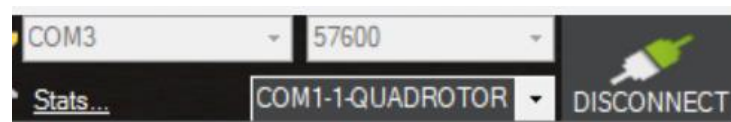


Figura 2.14. Mission Planner Status Connected [Fuente propia]

2.3.2.2. Acelerómetro

La calibración del acelerómetro se realiza en la ventana de Setup > Mandatory Hardware > Accel Calibration, que se muestra en la Figura 2.15. Para ello se deben seguir los pasos que se detalla en [27] donde se puede encontrar un video para una mejor comprensión.

Las calibraciones que se realizan corresponden a: calibración de 3 ejes, ajuste de la posición nivelada, y una calibración simple. Esta última, solo calibra las compensaciones principales de los acelerómetros, no las variaciones menores fuera del eje [27].

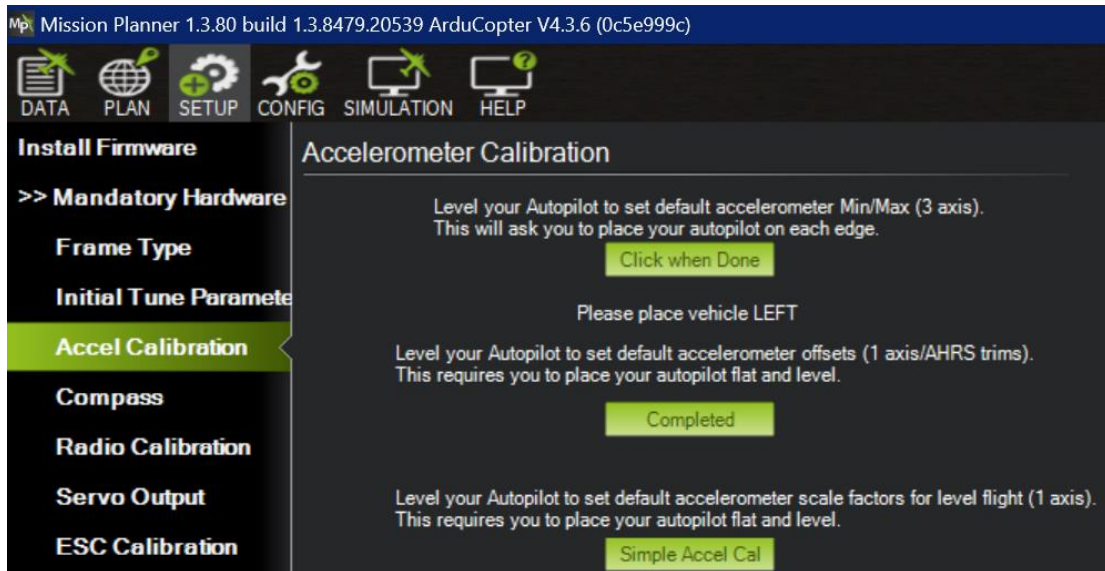


Figura 2.15. Mission Planner Accel Calibration [Fuente propia]

2.3.2.3. Radio Control

La calibración del radio control se realiza en la ventana de Setup > Mandatory Hardware > Radio Calibration que se muestra en la Figura 2.16. Para ello se deben seguir los pasos que se detalla en [28], donde se puede encontrar un video para una mejor comprensión.

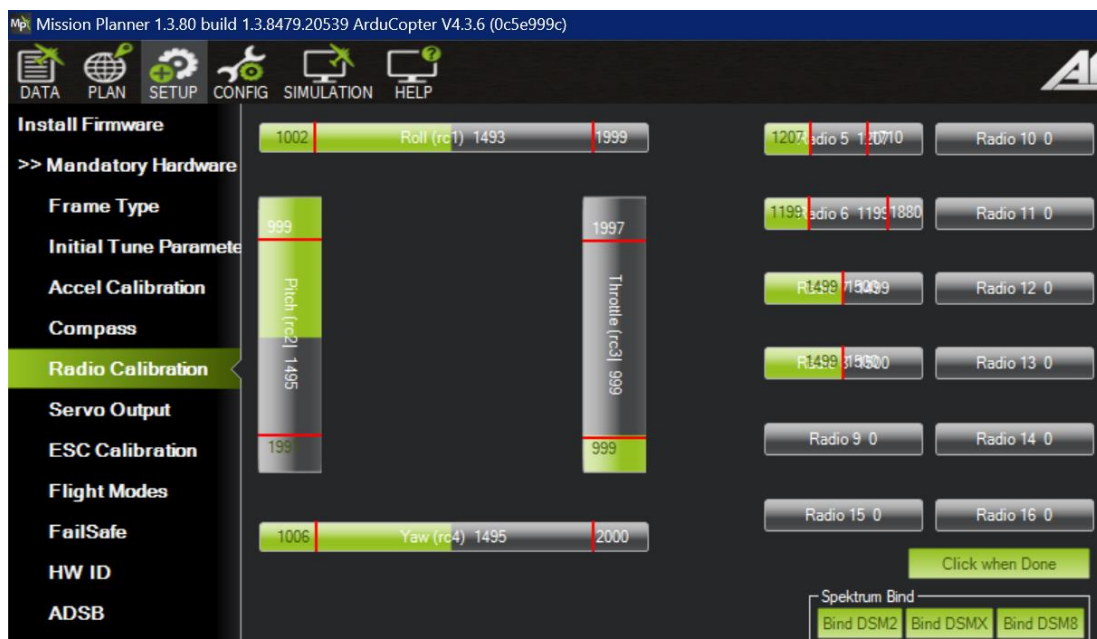


Figura 2.16. Mission Planner Radio Calibration [Fuente propia]

La calibración inicia al seleccionar “Calibrate Radio” y se muestra la ventana de la Figura 2.16. en la que se deben ir moviendo las palancas del radio control hasta los extremos superior, inferior, derecho e izquierdo. Al finalizar la calibración se selecciona “Click when Done”.

2.3.2.4. ESCs

La calibración de los ESCs se realiza en la ventana de Setup > Mandatory Hardware > ESC Calibration, que se muestra en la Figura 2.17; Para ello se deben seguir los pasos que se detallan en [29]. Como medida de seguridad es importante tomar en cuenta que los motores deben estar sin propelas. Una vez que termina la calibración se debe reiniciar el UAV desconectándolo de la batería y conectándolo nuevamente.

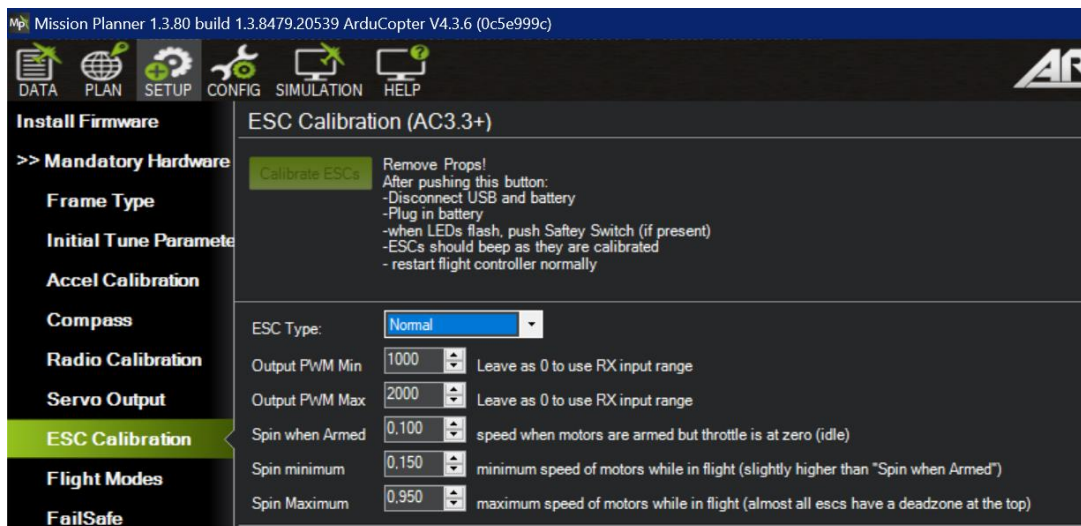


Figura 2.17. Mission Planner ESC Calibration [Fuente propia]

2.3.2.5. Modos de Vuelo

La configuración de los Modos de Vuelo se la realiza en la ventana de Setup > Mandatory Hardware > Flight Modes, que se muestra en la Figura 2.18. Para ello se debe elegir un interruptor de tres posiciones del radio control cuya función será cambiar el modo de vuelo y verificar el número de *Flight Mode* que corresponda. Se asignan los modos de vuelo de acuerdo a lo indicado en la Sección 1.4.2.3; esto es, en Flight Mode 1 se asigna “Stabilize”, en el 4 se asigna “Loiter” y en el 5 se asigna “RTL”. Los demás modos de vuelo no se utilizarán porque no están asignados a un interruptor del radio control.

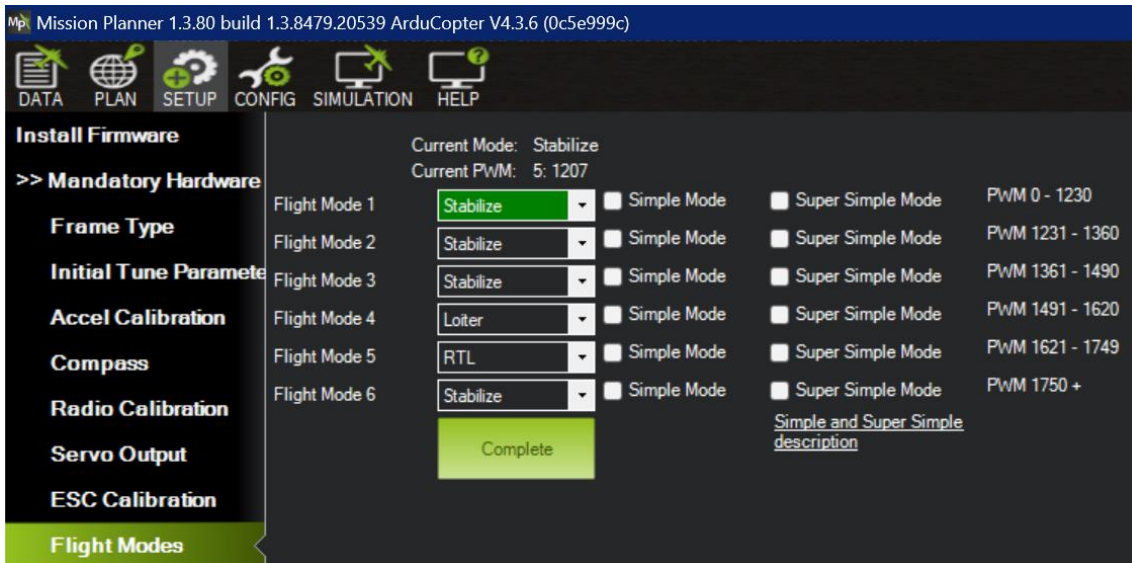


Figura 2.18. Mission Planner Flight Modes [Fuente propia]

2.3.2.6. Test de Motores

El test a los motores se realiza en la ventana de Setup > Mandatory Hardware > Motor Test, que se muestra en la Figura 2.19. En dicho test el piloto debe verificar el sentido de giro del motor de acuerdo a la Figura 2.4. de la Sección 2.1.3, y si los motores aumentan su aceleración conforme se sube el valor del throttle (aceleración).



Figura 2.19. Mission Planner Initial Motor Test [Fuente propia]

2.3.2.7. Monitor de Batería

La configuración del Monitor de Batería se realiza en la ventana de Setup > Optional Hardware > Battery Monitor, que se muestra en la Figura 2.20. Como se indica en [30] se debe escoger si se desea medir voltaje, corriente, o ambos, en este caso se escoge voltaje; como sensor se escoge la opción Otro (Other) ya que no se encuentra en la lista de módulos de potencia compatibles; y en la opción “HW Ver” se escoge el controlador de vuelo Pixhawk Cube.

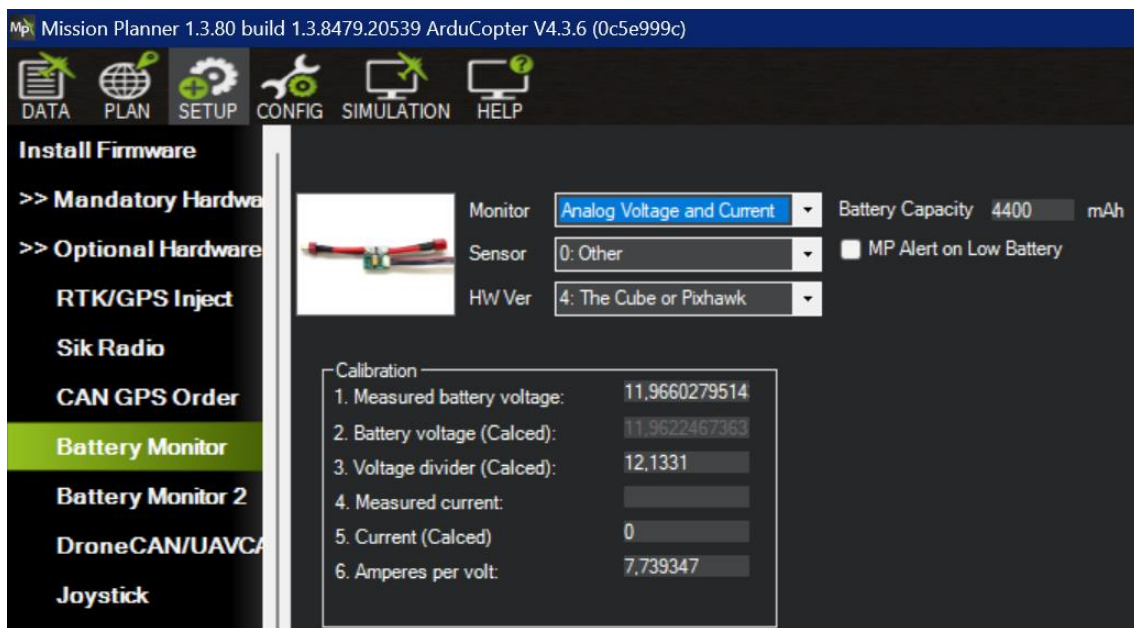


Figura 2.20. Mission Planner Battery Monitor [Fuente propia]

Posteriormente con un medidor externo de baterías, se mide el voltaje y se lo ingresa en “Measured Battery Voltage”. Mission Planner calculará automáticamente el resto de parámetros respecto al voltaje.

2.3.2.8. Initial Tune Parameter

La configuración inicial de los parámetros de la batería se realiza en la ventana Setup > Mandatory Hardware > Initial Tune Parameter (Figura 2.21). En esta sección se realiza una configuración automática de varios parámetros que se encuentran en [31]. Esto ingresando los datos de placa de la batería que se utilizará que se encuentran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros para la configuración de la batería

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|-----------|
| Número de celdas | 3 |
| Voltaje total | 11.1 [V] |
| Corriente | 5200 [mA] |
| Voltaje mínimo por celda | 3.65 [V] |
| Voltaje máximo por celda | 4.15 [V] |

Los respectivos valores de la batería se ingresan en la ventana de la Figura 2.21. Para ello, primero se deben haber realizado las calibraciones y configuraciones necesarias (explicadas anteriormente), así como el test de motores y la configuración del monitor de voltaje de la batería.

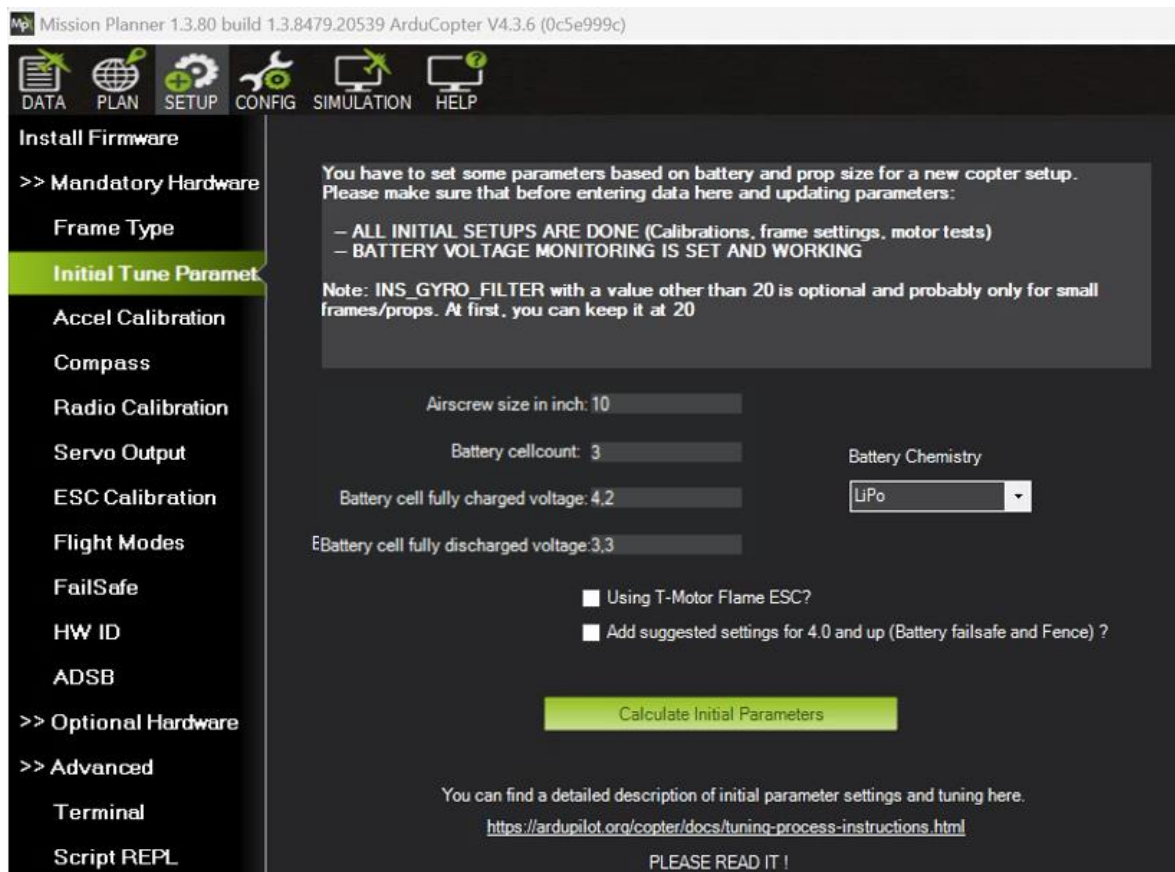


Figura 2.21. Mission Planner Initial Tune Parameter [Fuente propia]

2.3.3 PARÁMETROS

En la Tabla 2.4. se presentan los parámetros configurados para asegurar un correcto funcionamiento del cuadricóptero al volarlo de manera manual o automática mediante

misiones predefinidas. Los parámetros más representativos son aquellos que determinan la velocidad lineal y angular del cuadricóptero en los modos de vuelo que se emplearán, los mismos, que acorde a lo explicado anteriormente son: modo manual, automático (misiones), RTL, y Loiter.

Tabla 2.4. Misión Planner Parámetros

| PARÁMETRO | VALOR | DESCRIPCIÓN |
|----------------|-----------------------|---|
| RTL_ALT | 500 cm | Altitud mínima a la que el vehículo ascenderá antes de regresar. Si se encuentra a una altitud mayor, regresará en su altitud actual. |
| RTL_ALT_FINAL | 0 | Altitud a la que se moverá el vehículo en la etapa final de RTL. Valor de cero para aterrizar. |
| RTL_SPEED | 0 | Velocidad horizontal en modo RTL. Si está en cero se utilizará el valor de WPNAV_SPEED |
| LOITER_SPEED | 1250 cm/s | Velocidad máxima horizontal en modo Loiter |
| LOITER_ACC_MAX | 500 cm/s ² | Aceleración máxima en modo Loiter |
| LAND_SPEED | 20 cm/s | Velocidad de descenso para etapa final de aterrizaje |
| LAND_ALT_LOW | 10 cm | Altitud durante el aterrizaje en la que el vehículo reduce la velocidad a LAND_SPEED |
| WPNAV_ACCEL | 250 cm/s ² | Aceleración horizontal durante las misiones |
| WPNAV_ACCEL_Z | 100 cm/s ² | Aceleración vertical durante las misiones |
| WPNAV_SPEED | 300 cm/s | Velocidad horizontal durante las misiones |
| WPNAV_SPEED_DN | 150 cm/s | Velocidad de descenso durante las misiones |
| WPNAV_SPEED_UP | 100 cm/s | Velocidad de ascenso durante las misiones |
| ANGLE_MAX | 30 grados | Ángulo máximo de inclinación en todos los modos de vuelo |

2.4 OPCIÓN ALTERNATIVA: PX4 + QGROUNDCONTROL

2.4.1 INSTALACIÓN DEL FIRMWARE

Para la instalación del firmware alternativo PX4 en el cuadricóptero, se debe conectar el controlador de vuelo Pixhawk Cube Black a la computadora por medio de un cable micro USB. En la estación de control alternativa, QgroundControl, en la ventana de “Vehicle Setup” se abre la pestaña “Firmware Setup”. Una vez que detecta la placa Pixhawk se abre una pestaña de opciones donde se elige el firmware que se desea cargar como se muestra en la Figura 2.22.

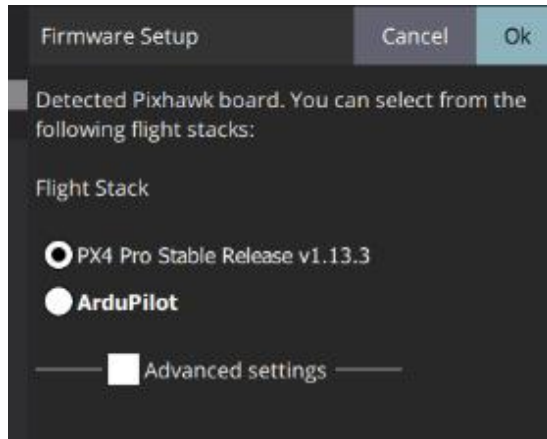


Figura 2.22. QgroundControl Firmware Setup [Fuente propia]

Se selecciona la opción PX4 Pro Stable Release v1.13.3, y al dar clic en OK empieza el proceso de instalación, como se muestra en la Figura 2.23.

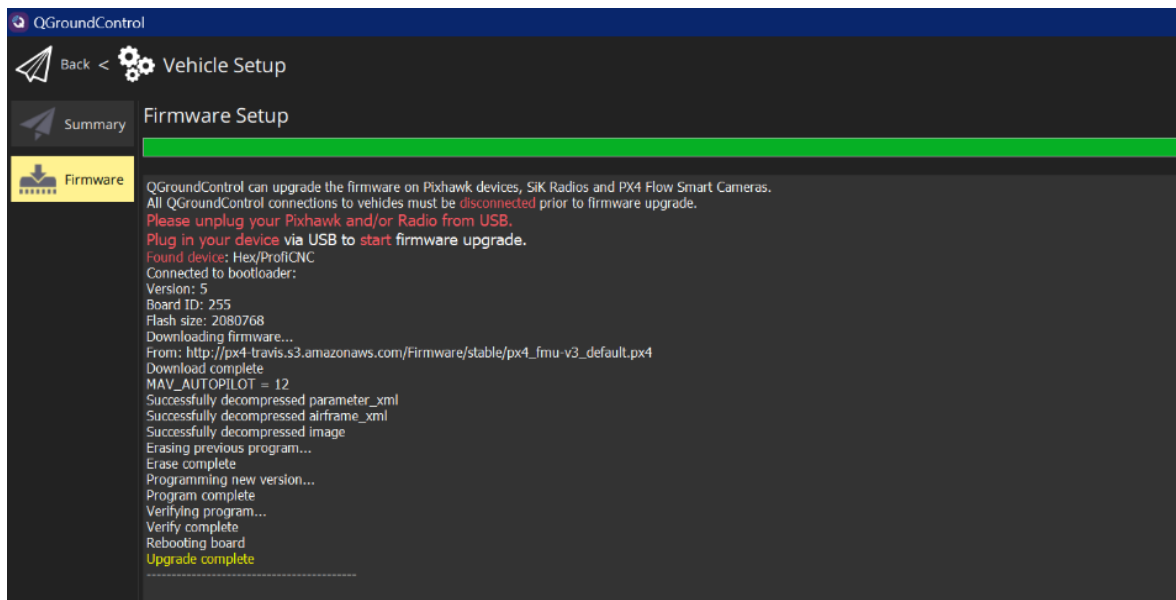


Figura 2.23. QgroundControl Firmware Setup Completo [Fuente propia]

Una vez instalado el firmware, aparece el resumen general de la configuración del vehículo que se muestra en la Figura 2.24, en el que se indica qué parámetros necesitan configuración o calibración, siendo los principales la selección de un airframe, los sensores, el radio control, y determinación de modos de vuelo.



Figura 2.24. QgroundControl Summary [Fuente propia]

Para finalizar con la instalación, se debe escoger el Airframe adecuado para el tipo de vehículo que se tiene, en este caso, un cuadricóptero con frame F450. En la Figura 2.25. se presenta la ventana de selección del Airframe, donde se escoge la opción “Quadrotor x” con un Frame tipo “DJI F450 w/ DJI ESCs”

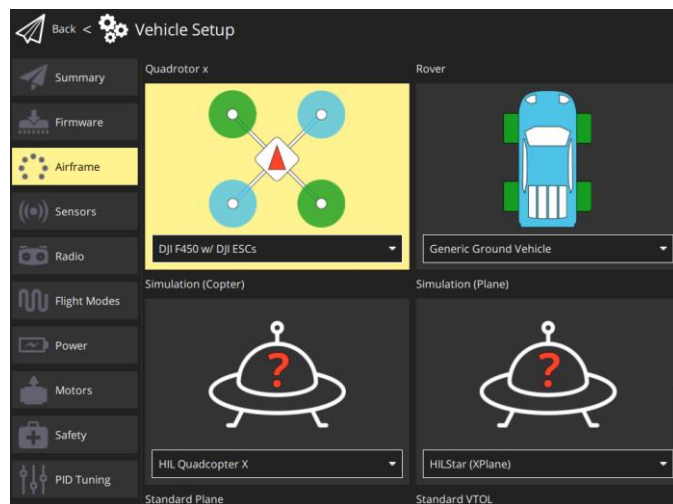


Figura 2.25. QgroundControl Airframe [Fuente propia]

Una vez que se ha configurado completamente el firmware se puede tener la facilidad de no utilizar el cable sino el enlace de telemetría, entonces para hacer esto se debe configurar correctamente el receptor y transmisor del radio control. En la estación de control se crea un enlace Común tipo Serial con un Baud Rate de 5700 [baud] cuya configuración se muestra en la Figura 2.26. De esta manera, se garantiza la comunicación entre el receptor y el trasmisor de radio control por medio de telemetría, lo cual permite realizar configuraciones o calibraciones en la estación de control sin necesidad de conectar el Pixhawk Cube por medio de cable USB.

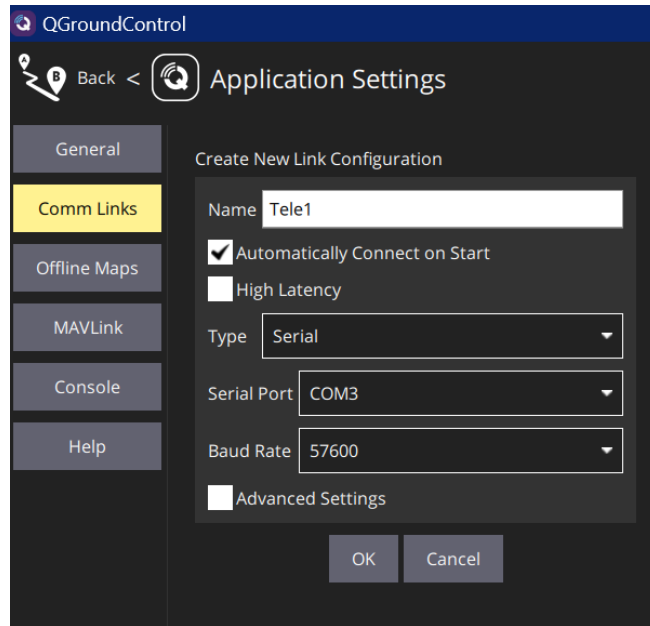


Figura 2.26. Mission Planner [Fuente propia]

2.4.2 CALIBRACIONES Y CONFIGURACIONES

Se realiza la configuración de acuerdo a las opciones disponibles en la ventana de configuración de vehículo de la estación de control QgroundControl. A continuación, se detallarán las configuraciones y calibraciones realizadas.

2.4.2.1 Sensores

- **COMPASS:** Para la calibración del compás se debe rotar el vehículo de manera continua de acuerdo con lo que indicaba QgroundControl (Figura 2.27)



Figura 2.27. QgroundControl Compass Calibration [Fuente propia]

- **GIROSCOPIO:** Para la calibración del Giroscopio se debe ubicar el cuadricóptero en la orientación que indica QgroundControl y mantenerlo estático. (Figura 2.28)

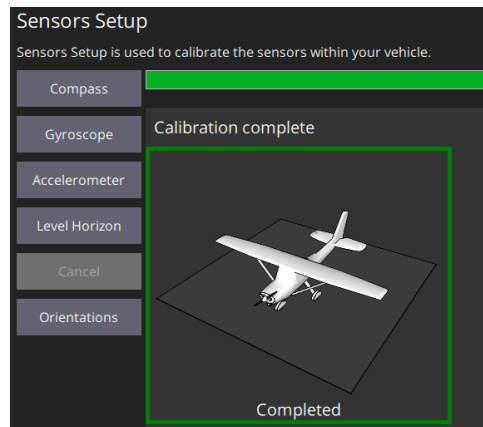


Figura 2.28. QgroundControl Gyroscope Calibration [Fuente propia]

- **ACELERÓMETRO:** Para la calibración del acelerómetro se debe ubicar el cuadricóptero en las seis orientaciones que se indican en QgroundControl y mantenerlo estático por unos segundos en cada una (Figura 2.29).

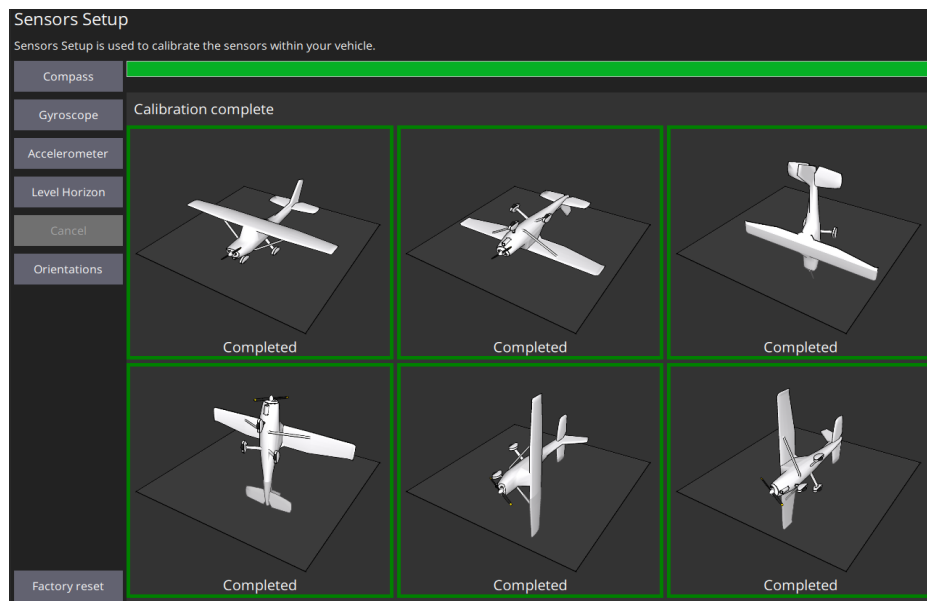


Figura 2.29. QgroundControl Accelerometer Calibration [Fuente propia]

- **NIVEL HORIZONTE:** En el caso de los UAVs tipo copters, la posición de vuelo nivelada se refiere a la posición de vuelo estacionario. Para la calibración del nivel del horizonte se debe ubicar el vehículo en su posición de vuelo nivelada y mantenerlo estático sobre una superficie igualmente nivelada (Figura 2.30) [32].

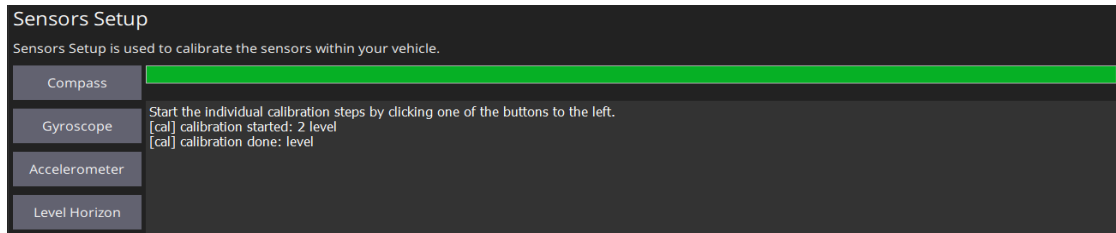


Figura 2.30. QgroundControl Level Horizon Calibration [Fuente propia]

- **ORIENTACIONES:** Se ajustan las orientaciones del autopiloto y de la brújula según sus ubicaciones en el cuadricóptero, las cuales se establecen de acuerdo a su orientación respecto a la posición frontal del vehículo como se observa en la Figura 2.31 [32].

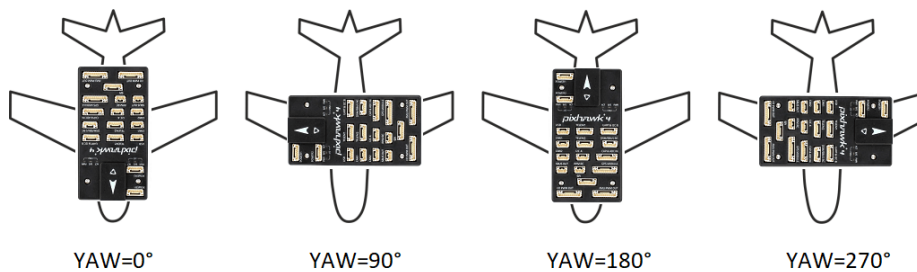


Figura 2.31. Orientaciones del Autopiloto respecto al UAV [33]

La orientación del autopiloto coincide con la posición frontal del vehículo, por lo tanto, su orientación es de 0° y el valor del parámetro Autopilot Orientation es Rotation_None. Por otro lado, la brújula se encuentra internamente con una orientación de 270° respecto a la posición frontal del vehículo, por lo que el valor del parámetro Mag 1 Orientation será Rotation_Yaw_270 (véase Figura 2.32).

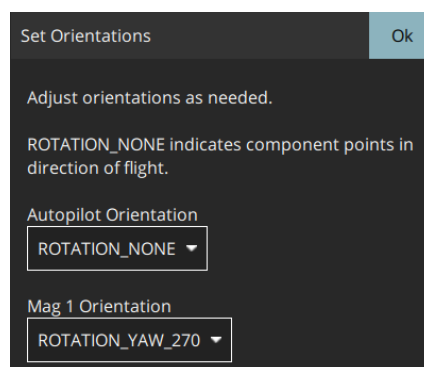


Figura 2.32. QgroundControl configuración de orientaciones [Fuente propia]

2.4.2.2 Radio Control

Al calibrar el radio control también se realiza: la calibración del transmisor y asignación de canales que controlarán el Roll, Pitch, Yaw y Throttle. Estos son los movimientos que puede realizar el cuadricóptero que se muestran en la Figura 2.33 (a) mediante el movimiento de las palancas del radio control, como se muestra en la Figura 2.33 (b).

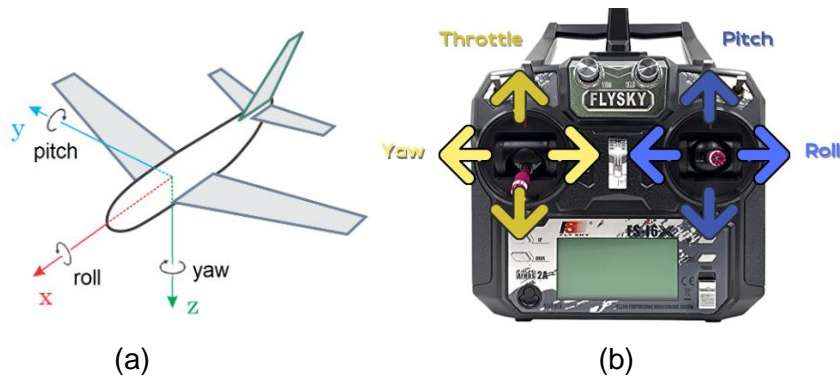


Figura 2.33. (a) Movimientos de un UAV [33] (b) Movimientos del Radio Control FlySky (Modo 2) [Fuente propia]

En primer lugar, se debe elegir entre “Mode 1” o “Mode 2” de acuerdo a la ubicación de las palancas del radio control FlySky. La ubicación de la palanca del throttle se determina observando la que se encuentra en posición cero (hacia abajo). En el modo 1 la palanca de throttle se encuentra a la izquierda, y en el modo 2 se encuentra a la derecha como se muestra en la Figura 2.34. Debido a la explicación anterior, se elige el “Mode 2” en la sección de Calibración del Radio y se inicia la calibración seleccionando el botón “Calibrate” y siguiendo las instrucciones dadas en la estación de control. En [34] se encuentra de manera más detallada los pasos a seguir para la calibración del radio control.

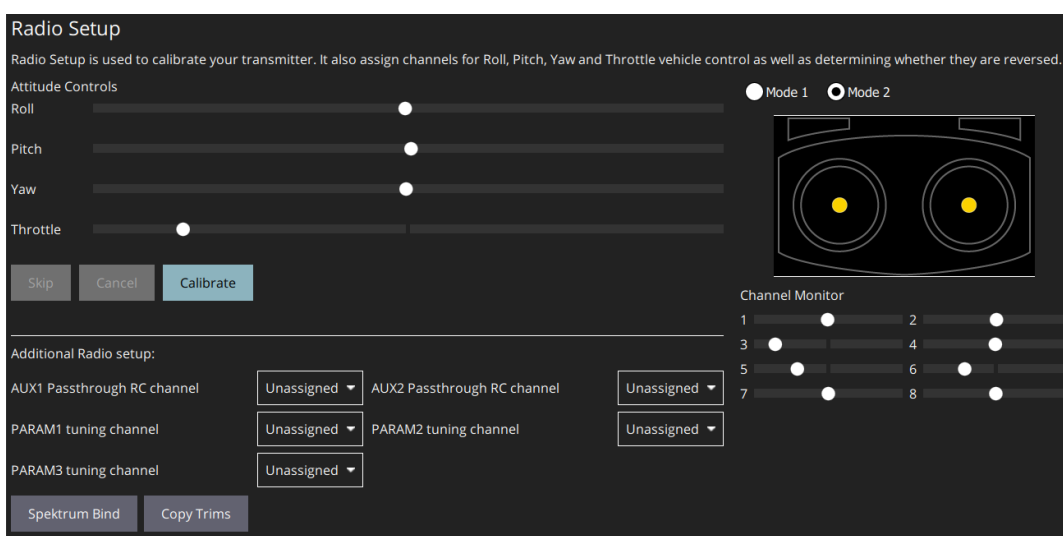


Figura 2.34. QgroundControl Radio Calibration [Fuente propia]

2.4.2.3 Modos de vuelo

Esta sección permite asignar modos de vuelo a los canales de radio y, por lo tanto, a los interruptores del radio control. Para configurar los modos de vuelo, primero se debe configurar el radio control para codificar las posiciones físicas del interruptor elegido para dicho fin, en un solo canal [35]. En este caso se elige de manera aleatoria el Canal 5, al cual se le asigna el interruptor superior número 3. En la posición por defecto (hacia arriba) del interruptor correspondiente al canal 5 se asigna el modo de vuelo Stabilized, el cual permite armar el cuadricóptero para poder realizar el despegue. Para la posición central del interruptor se asigna el modo de vuelo Position, y para la posición del interruptor hacia abajo se asigna el modo de vuelo Return, los cuales están explicados de forma más detallada en la Sección 1.4.2. En la Figura 2.35. se observa que existen 6 modos de vuelo, sin embargo, dependiendo del radio control que se utilice solo algunos se encuentran activos. La manera más fácil de determinar qué modos de vuelo corresponden a cada posición del interruptor, es necesario moverlo arriba, al centro y abajo y observar en la sección de Configuración de Modos de Vuelo aquel que se pinte de color amarillo. Una explicación más detallada de la configuración de los modos de vuelo se encuentra en [36].

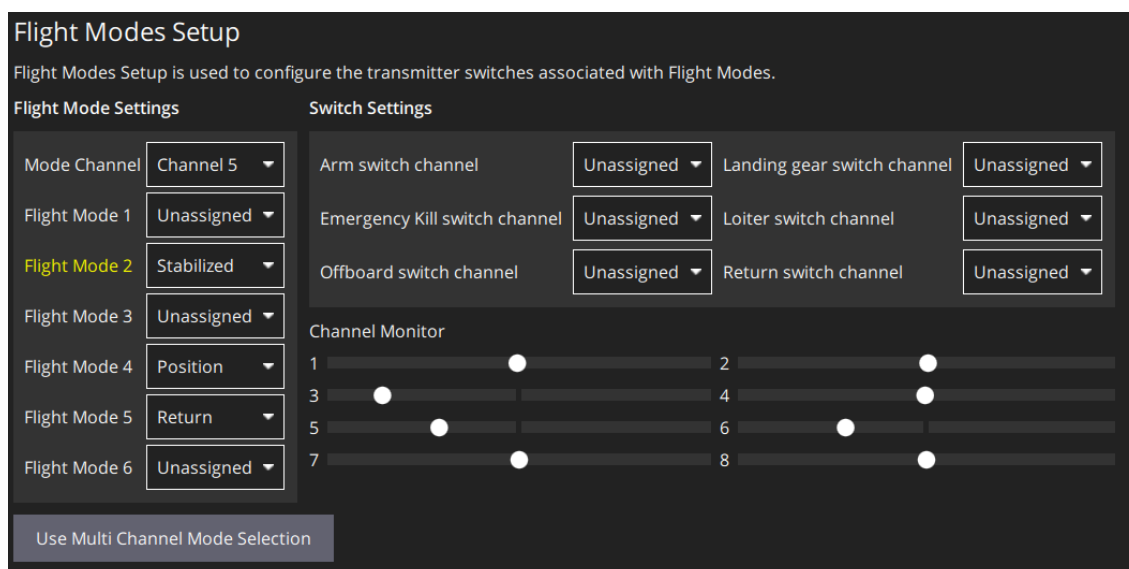


Figura 2.35. QgroundControl Configuración de Modos de Vuelo [Fuente propia]

2.4.2.4 Calibración Alimentación y ESCs

Para establecer el valor correcto del módulo de alimentación se deben conocer los parámetros de la batería que se utilizará para el UAV; como se presentó anteriormente, se emplean los parámetros que se encuentran en la Tabla 2.3, donde se detallan los valores

nominales de la batería LiPO como lo son: voltaje y corriente nominal, número de celdas, voltaje mínimo por celda y voltaje máximo por celda.

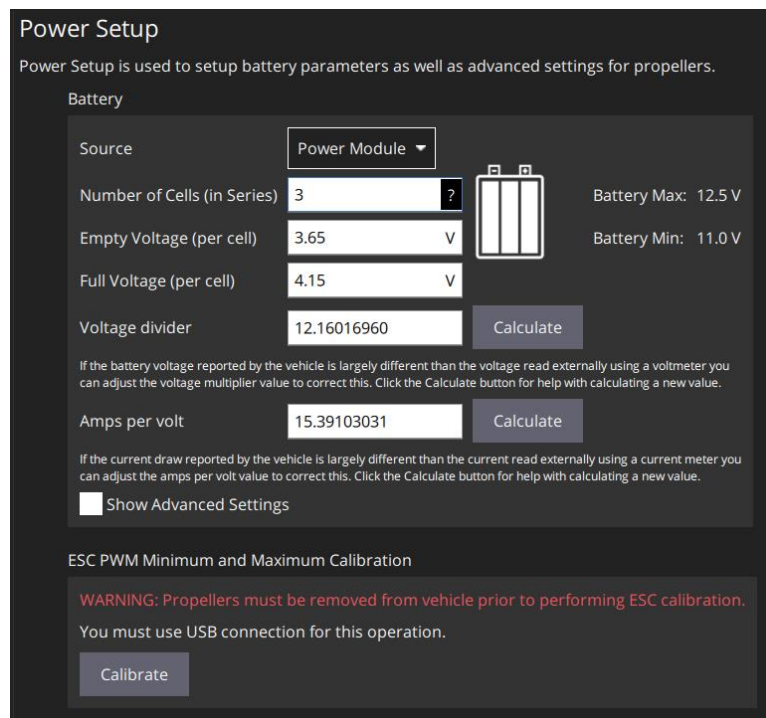


Figura 2.36. QGroundControl Power Calibration[Fuente propia]

Estos parámetros se ingresan en la ventana de calibración de alimentación que se muestra en la Figura 2.36. Posteriormente, para calcular el voltaje del divisor (Voltage divider) se presiona la opción “Calculate” que se observa en la Figura 2.36. Aparecerá una ventana emergente en donde se debe ingresar el valor del voltaje real de la batería con ayuda de un medidor de voltaje.

En este caso, también se realiza la calibración de los ESCs en la ventana de configuración de alimentación que se muestra en la Figura 2.36. de la subsección anterior. En la parte inferior se encuentra un botón llamado Calibrate, que al presionar empieza la calibración automática de los ESCs. La calibración no comenzará a menos que el cuadricóptero se encuentre conectado por medio del cable USB a la computadora y como medida de seguridad los motores deben estar sin propelas.

2.4.2.5 Motores

En la ventana de configuración de los motores que se muestra en la Figura 2.37. se realizó la prueba del control y dirección de los cuatro motores, con el objetivo de probar su correcto funcionamiento. Como se observa se tienen 5 sliders, uno por cada motor y el último slider

que corresponde a todos los motores. Al aumentar cualquiera de los sliders comenzará a moverse el motor correspondiente, de modo que es posible verificar si el motor gira correctamente. Es decir, si el motor aumenta su velocidad conforme se aumenta la posición del slider (aceleración), o si gira en el sentido correcto ya sea horario o antihorario según corresponda. Como medida de seguridad, de igual manera que para la calibración de los ESCs, se deben retirar las propelas del UAV por precaución.

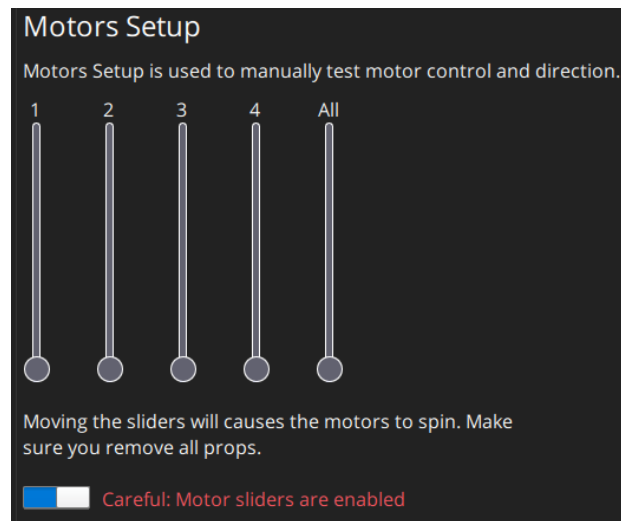


Figura 2.37. QGroundControl Motors Setup [Fuente propia]

2.4.2.6 Sección de Seguridad

En esta sección se configuran los parámetros que se encuentran en la Tabla 2.5. Se establecen la acción de seguridad y los niveles de advertencia, seguridad y emergencia de la batería en caso de niveles bajos. También se establece la acción de seguridad y el tiempo de espera hasta realizar dicha acción en caso de perder la señal del radio control, y en caso de perder la señal de enlace de datos. Además, se realizan las configuraciones de seguridad para los modos RTL (Regresar al despegue) y Land (Aterrizaje).

Tabla 2.5. Parámetros de seguridad

| | | |
|--|--|-----------------|
| BATERÍA BAJA | Acción de seguridad: | Advertencia |
| | Nivel de advertencia: | 40.00% |
| | Nivel de seguridad: | 25.00% |
| | Nivel de emergencia: | 10.00% |
| PÉRDIDA DE LA SEÑAL DEL RADIO CONTROL | Acción de Seguridad | Modo de Retorno |
| | Tiempo de espera de pérdida de señal RC: | 0.5 [s] |

| | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| PÉRDIDA DE ENLACE DE DATOS | Acción de seguridad: | Modo de Retorno |
| | Tiempo de espera: | 10.0 [s] |
| CONFIGURACIÓN MODO RTL | Subir a la altitud de: | 5.0 [m] |
| | Regresar al lanzamiento, luego: | Aterrizar inmediatamente |
| CONFIGURACIÓN MODO LAND | Tasa de descenso: | 0.7 [m/s] |
| | Desarmar después de: | 2.0 [s] |

Cabe resaltar que en Mission Planner sí existen estos parámetros, pero se los ha dejado seteados en sus valores por default, mismos que, de ser necesario, pueden ser modificados.

2.4.3 PARÁMETROS

En la Tabla 2.6. se presentan los parámetros configurados para asegurar un correcto funcionamiento del cuadricóptero al volarlo de manera manual o automática mediante misiones predefinidas. Los parámetros más representativos son aquellos que determinan la velocidad lineal y angular del cuadricóptero en los modos de vuelo que se emplearán, como lo son: modo manual, automático, RTL, y position. Además, de igual manera se configuran los parámetros que establezcan los valores mínimos y máximos de altitud en los modos de vuelo de interés, de tal manera que el UAV no se eleve demasiado y evitar cualquier riesgo. Adicional, se desactiva el desarme automático después del aterrizaje y el tiempo de espera para el desarme automático de modo que sea el piloto del dron quien tome la decisión de en qué momento desarmar el UAV. Finalmente, por seguridad, se asigna la acción de armar el cuadricóptero mediante un gesto con la palanca izquierda (en dirección del yaw) del radio control, que consiste en llevarla a la izquierda por unos segundos hasta que el vehículo se arme, y soltarla.

Tabla 2.6. QGroundControl Parámetros

| PARÁMETRO | VALOR | DESCRIPCIÓN |
|------------------|--------------|--|
| MPC_VEL_MANUAL | 3.00 m/s | Punto de consigna máximo de velocidad horizontal para el modo de control manual. |
| MPC_XY_CRUISE | 3.00 m/s | Velocidad horizontal predeterminada en la misión |
| MPC_XY_VEL_MAX | 5.00 m/s | Velocidad horizontal máxima |
| MPC_YAWRAUTO_MAX | 30.0 deg/s | Tasa máxima de giro (yaw) en modo automático. |

| | | |
|------------------|------------------------------|---|
| MPC_YAW_MODE | Towards waypoint (yaw first) | Modo de giro (Yaw) |
| MPC_LAND_ALT1 | 7.0m | Altitud para el primer paso del aterrizaje lento (descenso). |
| MPC_LAND_ALT2 | 5.0m | Altitud para el segundo paso del aterrizaje lento (descenso). |
| MPC_LAND_ALT3 | 1.0m | Altitud para el tercer paso del aterrizaje lento (descenso). |
| RTL_RETURN_ALT | 5.0 m | Altitud de retorno en modo de retorno |
| RTL_DESCEND_ALT | 5.0 m | Altitud de espera en modo de retorno |
| RTL_MIN_DIST | 5.0 m | Radio horizontal desde el punto de retorno dentro del cual se aplican reglas especiales para el modo de retorno |
| COM_DISARM_LAND | 2.00 s | Tiempo de espera para el desarme automático después del aterrizaje. Valor negativo para desactivar |
| COM_DISARM_PRFLT | 10.00 s | Tiempo de espera para el desarme automático si no se despega. Valor negativo para desactivar |
| MAN_ARM_GESTURE | Enables | Habilitar el gesto de activación/desactivación con el stick |

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizarán pruebas de vuelo manuales pilotadas desde el radio control, para ello primero se coloca el UAV en modo Stabilized para poder armar los motores y subirlo hasta una altitud considerable; posteriormente se coloca en modo Loiter/Position para maniobrar el dron mediante el radio control. Además, se realizarán misiones de vuelo en modo automático configuradas desde la estación de control en tierra, se incluyen los modos de vuelo de despegue (Takeoff) y aterrizaje (Return to Launch) para que el UAV realice una trayectoria donde comienza ubicándose en el punto de partida, despega para realizar la misión, por ejemplo, una trayectoria sencilla es un cuadrado. Adicional, en las pruebas para certificar pilotos de UAVs se suelen realizar maniobras que involucren cambio de dirección y sentido de giro, siendo de las más comunes hacer una S digital. Para poner a prueba los dos autopilotos se realizará en modo automático esta trayectoria y se comparará el desempeño de las dos opciones: original y alternativa. Por esto, las misiones a realizarse son:

- Misión Manual mediante radio control
- Misión Automática mediante estación de control – S digital

3.1.1 PRUEBAS MANUALES

En las pruebas manuales se verificará el control de movimientos laterales y verticales en el modo de vuelo Loiter para ArduPilot y Position para PX4, dado que estos modos son equivalentes. Se evaluará el control de altura y la maniobrabilidad del UAV, es decir su respuesta ante los cambios que realiza el piloto mediante el radio control; así como que se mantenga el valor máximo de velocidad. Además, se comprobará el correcto funcionamiento de motores, radio control, y sistema de telemetría.

Para la prueba manual se despegó el dron en el modo de vuelo Stabilized, hasta una altitud manejada por los pilotos experimentados del proyecto de 6.5 [m], luego se cambia al modo de vuelo Loiter para ArduPilot y Position para PX4, y se lo ubica en un punto fijo. En la Sección 1.4.2.3 se explicó que en el modo de vuelo Loiter/Position se mantiene al UAV en posición fija en contra del viento. Una vez en un punto fijo, se lo mueve hacia al frente por 3 s, a la izquierda también por 3 s, hacia atrás nuevamente por 3 s, a la derecha por 6 s, hacia al frente por 6 s, a la izquierda por 3s y finalmente hacia atrás por 6s regresando al punto de partida. Finalmente, se lo rota sobre su propio eje y aterriza. Todas estas maniobras se muestran en la Figura 3.1, mismas que fueron realizadas para cada configuración de firmware (Ardupilot y PX4) comandando el multicoptero mediante el radio control.

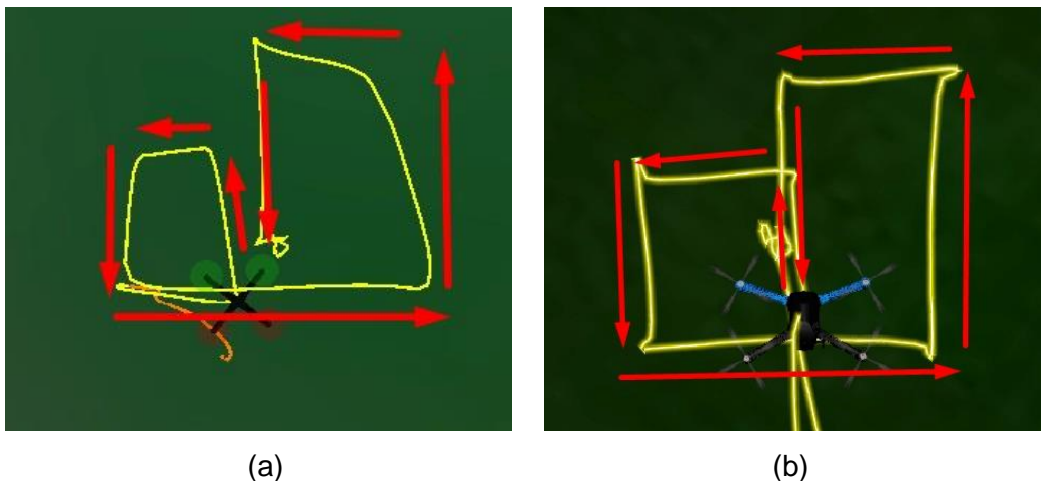


Figura 3.1. (a) Maniobras ArduPilot (b) Maniobras PX4 [Fuente propia]

En ambos casos el cuadricóptero respondió a los movimientos comandados desde el radio control. Cabe indicar que durante estas pruebas también se mantuvo la comunicación con la estación de control. Por tanto, tanto el radio control como el sistema de telemetría funcionaron correctamente. Por otro lado, se observa que con PX4 (Figura 3.1 (b)) el dron sigue correctamente la trayectoria manual descrita anteriormente, mientras que con ArduPilot (Figura 3.1. (a)) en ciertos tramos se desvía y no mantiene un buen control de posición como se esperaría en modo Loiter.

En la Figura 3.2. se presenta la gráfica de la altitud relativa a punto de partida y la velocidad vertical en función del tiempo de la trayectoria realizada con PX4. Se observa que inicialmente se alcanza la altura de 6.5 [m] deseada, sin embargo, conforme se realizan las maniobras esta altitud empieza a decaer hasta llegar incluso a los 3.7 [m], lo cual es un valor muy bajo. Eso puede deberse a una incorrecta calibración de los sensores como el GPS y acelerómetro, o incluso a un problema con el componente Power Brick Mini que regula el voltaje, dado que durante todo el trayecto aparecía el mensaje “Bad Battery”. Respecto a la velocidad vertical se observa que se mantiene el valor configurado para el aterrizaje de 0.7 [m/s]. Además, dado que en términos generales el UAV se encontraba estable, el aterrizaje se decidió realizarlo en el modo de vuelo RTL, el cual se efectuó de manera adecuada ascendiendo en primer lugar a 5 [m] y posteriormente iniciando el aterrizaje con una velocidad vertical de 0.7 [m/s], como estaba configurado.

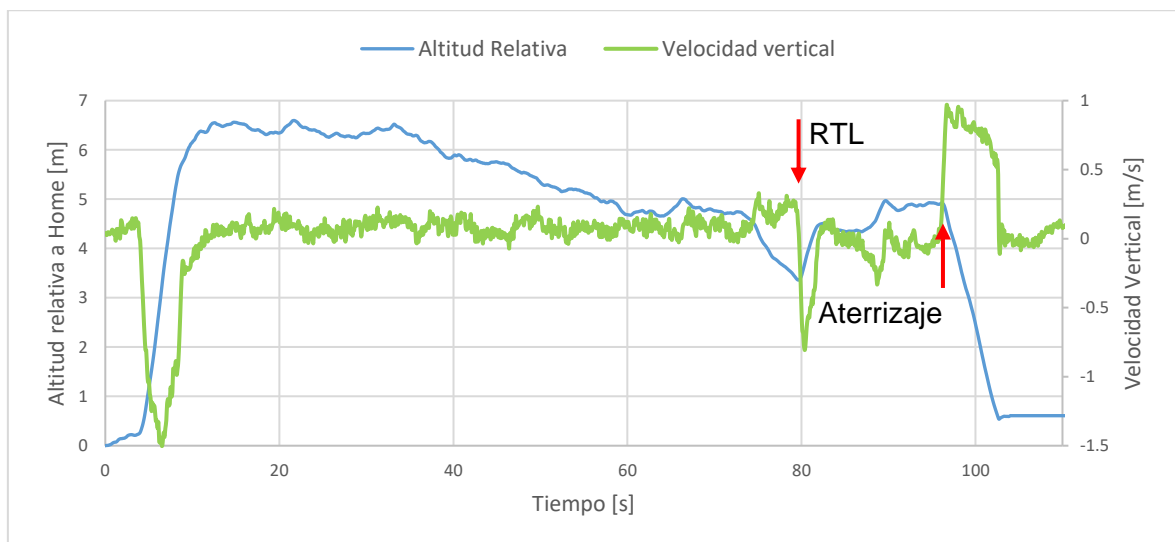


Figura 3.2. PX4 – Altitud Relativa y Velocidad vertical en el tiempo [Fuente propia]

En la Figura 3.3. se presenta la gráfica de la altitud relativa a punto de partida (POS.RelHomeAlt) y la velocidad vertical en [m/s] (PSCD.VD) en función del tiempo de la trayectoria realizada con ArduPilot. Se observa que el UAV asciende hasta la altitud

esperada de 6.5 [m] y mantiene correctamente su valor durante las maniobras realizadas, sin embargo, se evidenció cierta inestabilidad y una respuesta pobre ante dichas maniobras en el plano XY. Dado lo anteriormente mencionado, se decidió realizar el aterrizaje en el modo de vuelo Loiter bajando el throttle muy suavemente. Se observa que la velocidad vertical al momento de aterrizaje presenta un comportamiento inestable con varios picos y cambios muy bruscos de velocidad, resultando en un aterrizaje muy brusco del UAV y en daños físicos en dos motores. Además, durante toda la trayectoria también se observó el mensaje de alerta de “Bad Battery”.

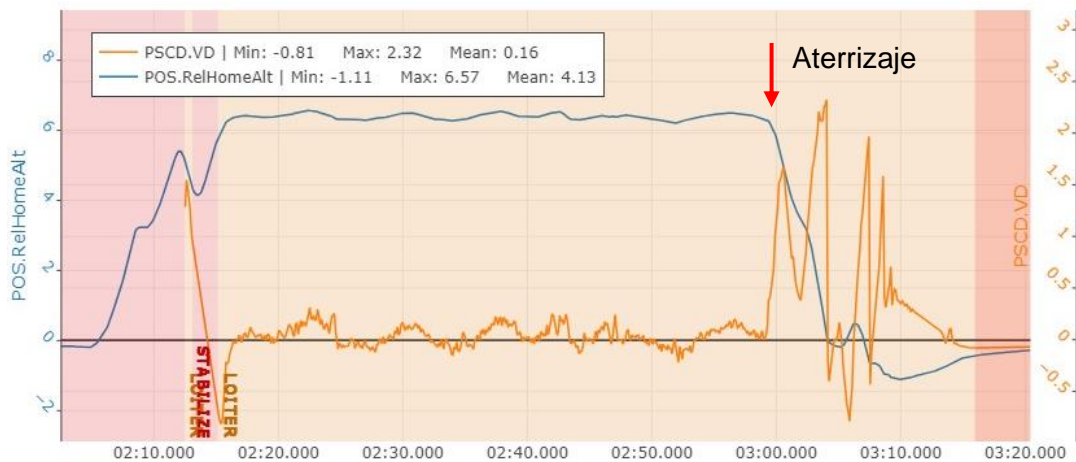


Figura 3.3. ArduPilot – Altitud Relativa y Velocidad vertical en el tiempo [Fuente propia]

En base a lo mencionado, a manera de corrección en cuanto al hardware se cambiaron dos motores cuyo eje vibraba demasiado y que ocasionaban vibraciones en el dron. Esto pudo deberse a alguna caída que sufrió el cuadricóptero y tal vez algún golpe en dichos motores, lo cual pudo ocasionar que el eje no se encuentre centrado. Además, debido al mensaje consistente de “Bad Battery” que aparecía en ambos casos, se determinó un problema con el regulador de voltaje Power Brick Mini por lo que se procedió a cambiarlo y verificar que efectivamente se solucionó el problema.

En cuanto a PX4, se realizaron nuevamente las calibraciones de los sensores, con lo cual se solucionó el problema de control de altura en el modo de vuelo Position, y la calibración de los ESCs necesaria debido al cambio del componente Power Brick Mini. Por otro lado, para ArduPilot fue necesario cargar un nuevo firmware y cargar los parámetros que se venían utilizando previamente en el proyecto de investigación, y a partir de ello realizar ligeros cambios en parámetros como las velocidades horizontales y verticales. En el caso de la velocidad horizontal se cambió el valor de 12.5 [m/s] a 3 [m/s] para tener un mayor control manual mediante el radio control. Además, se realizaron respectivas calibraciones

del acelerómetro, compass y giroscopio. El problema que se tuvo con la velocidad vertical al bajar muy ligeramente el throttle puede deberse a que en las últimas versiones del firmware ArduPilot se ha añadido una opción de “Initial Tune Parameter” para configurar los parámetros relacionados con la batería, sin embargo, dado que es una nueva opción todavía presenta errores. Por lo tanto, la opción más factible fue mantener los parámetros del cuadricóptero original con los que no se tenían este tipo de problemas.

3.1.2 MISIÓN DE VUELO AUTÓNOMO: ARDUPILOT Y MISSION PLANNER

Para realizar la misión de vuelo se cargó el firmware de ArduPilot en el autopiloto Pixhawk Cube mediante la estación de control en tierra Mission Planner. Se realizaron tres misiones autónomas en todos los casos empleando los puntos que se encuentran en la Tabla 3.1 formando una S digital. Se debe tomar en cuenta que las coordenadas de latitud y longitud del punto 1 corresponden a la ubicación actual del cuadricóptero desde la cual despegará al iniciar la misión, mismo que se tomará como punto de origen para futuras comparaciones. Además, el valor del punto 7 es igual al del 1 ya que corresponde a la ubicación a la cual regresará el cuadricóptero en el modo de vuelo RTL. Durante toda la misión el cuadricóptero mantendrá una altitud aproximada de 7 metros. Todo esto se realizará en el modo de vuelo Auto.

Tabla 3.1. ArduPilot – Mission Planner Coordenadas para S digital

| N | Tipo | Latitud [°] | Longitud [°] | Altitud [m] |
|---|----------|-------------|--------------|-------------|
| 1 | Despegue | -0.2116778 | -78.4888649 | 7 |
| 2 | Waypoint | -0.2115775 | -78.4890008 | 7 |
| 3 | Waypoint | -0.2117183 | -78.4891190 | 7 |
| 4 | Waypoint | -0.2118404 | -78.4889781 | 7 |
| 5 | Waypoint | -0.2119839 | -78.4890881 | 7 |
| 6 | Waypoint | -0.2118806 | -78.4892423 | 7 |
| 7 | RTL | -0.2116778 | -78.4888649 | 7 |

El análisis se realizará para una de las misiones realizadas, sin embargo, las otras dos misiones autónomas se presentan en el Anexo I.

Los puntos para la misión se colocaron en Mission Planner en la ventana PLAN como se muestra en la Figura 3.4. y se cargaron en el autopiloto.



Figura 3.4. Mission Planner – Coordenadas S digital [Fuente propia]

De las misiones de vuelo realizadas se guardaron los respectivos logs de vuelo obtenidos media telemetría, cuya extensión es tlog o bin. Posteriormente estos son procesados mediante la herramienta web “UAV Log Viewer” propia de ArduPilot [37]. Dicha herramienta permite visualizar gráficamente el comportamiento de las variables en el tiempo, así como una gráfica en 3D de la trayectoria que siguió el UAV, como se observa en la Figura 3.5; en donde se muestra la primera prueba realizada. Además, se pueden exportar las variables de interés en un archivo .csv para poder realizar otras gráficas como por ejemplo la posición X vs Y.



Figura 3.5. ArduPilot – S digital 3D en UAV Log Viewer [Fuente propia]

Con el fin de comparar la trayectoria seguida por el UAV con la trayectoria aproximada de acuerdo a los puntos establecidos se realiza la gráfica de X vs Y (Longitud vs Latitud), que se presenta en la Figura 3.6, para la cual se toma como punto de origen (0,0) a la ubicación inicial del cuadricóptero. Como se observa el UAV sigue la trayectoria esperada, sin

embargo, no pasa a través de los puntos de SetPoint, sino que antes de llegar al punto empieza a girar para dirigirse al próximo waypoint. Esto ocurre con los puntos 2-6, mientras que con el punto 7 el cuadricóptero se detiene para ubicar el punto 1 (home) y regresar al lugar de despegue.

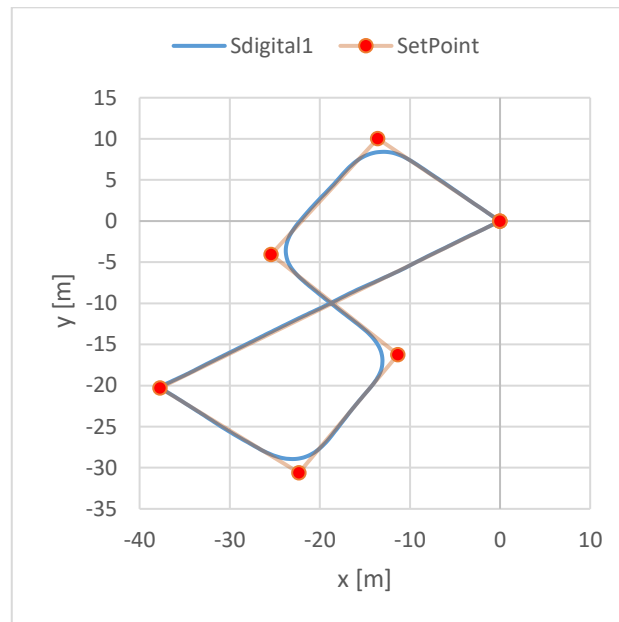


Figura 3.6. ArduPilot – Trayectoria S digital [Fuente propia]

Lo mencionado ocurre debido a que el parámetro WP_YAW_BEHAVIOR, se encuentra configurado como Face next waypoint except RTL, lo cual quiere decir que el UAV girará el yaw (sobre su propio eje) para estar de frente al siguiente waypoint, excepto en el RTL para una mayor precisión al momento de regresar a home.

Las coordenadas de latitud y longitud se trasladan a coordenadas en X y Y tomando como punto de origen la posición inicial del UAV (home), con el fin de calcular los errores relativos entre las coordenadas de los Setpoint y las coordenadas medidas de la trayectoria real seguida por el dron. Se presenta en la Tabla 3.2. las coordenadas y el cálculo de los errores relativos correspondientes, exceptuando los puntos 1 y 7 (home). Se observa que en su mayoría los errores son mayores al 5%, lo cual se debe principalmente a que, como se explicó anteriormente y como se observa en la Figura 3.6., el UAV antes de llegar al waypoint comienza a girar para dirigir su frente al siguiente waypoint, por lo que nunca se aproxima lo suficiente para obtener un error más pequeño.

Tabla 3.2. ArduPilot Errores Relativos – S digital

| Coordenada Setpoint | | Setpoint | | Medido | | Errores Relativos | |
|-------------------------------------|------------|----------|--------|--------|--------|-------------------|---------|
| Longitud[°] | Latitud[°] | x[m] | y[m] | x[m] | y[m] | EX% | EY% |
| -78.4888649 | -0.2116778 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| -78.4890008 | -0.2115775 | -13.59 | 10.03 | -12.9 | 8.42 | 5.08 % | 16.05 % |
| -78.4891190 | -0.2117183 | -25.41 | -4.05 | -23.77 | -3.87 | 6.45 % | 4.44 % |
| -78.4889781 | -0.2118404 | -11.32 | -16.26 | -10.49 | -14.54 | 7.33 % | 10.58 % |
| -78.4890881 | -0.2119839 | -22.32 | -30.61 | -20.25 | -31.2 | 9.27 % | 1.93 % |
| -78.4892423 | -0.2118806 | -37.74 | -20.28 | -34.76 | -19.97 | 7.90 % | 1.53 % |
| -78.4888649 | -0.2116778 | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 | - | - |
| Promedio de errores en X y Y | | | | | | 16.42 % | 19.88 % |

Por otro lado, se realiza la gráfica de la altitud relativa al punto de origen en función del tiempo, véase la Figura 3.7; en la misma se puede verificar que durante la misión el UAV mantiene una altura aproximada de 7[m]. Como se observa al iniciar la misión la altitud comienza a aumentar progresivamente hasta un valor aproximado de 7[m], posteriormente durante la misión el UAV mantiene una altitud estable con un valor promedio de 6.97 [m] y una desviación estándar de 0.0661 [m].

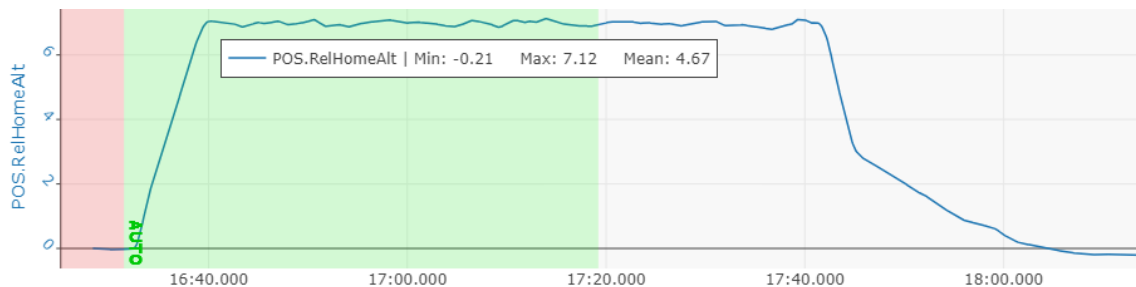


Figura 3.7. ArduPilot – Altitud Relativa en el tiempo [Fuente propia]

Al momento del aterrizaje desciende rápidamente con una velocidad de 1.5 [m/s] (WPNAV_SPEED_DN) hasta los 3 [m] (LAND_ALT_LOW), y posteriormente empieza a descender con una velocidad de 0.2 [m/s] (LAND_SPEED), hasta finalmente aterrizar, como se observa en la Figura 3.8 del último tramo de la misión donde el dron realiza el aterrizaje. Se muestra la altitud relativa a home, la velocidad deseada (PSCD.DVD) y la velocidad medida (PSCD.VD) en función del tiempo. Se observa que al empezar el aterrizaje a 1.5 [m/s] la velocidad real del UAV sobrepasa ligeramente el valor máximo hasta los 1.66 [m/s], y al llegar a los 3 [m] la velocidad real baja a menos de lo esperado llegando a 0 [m/s] pero intenta estabilizarse y aproximar su valor a 0.2 [m/s].

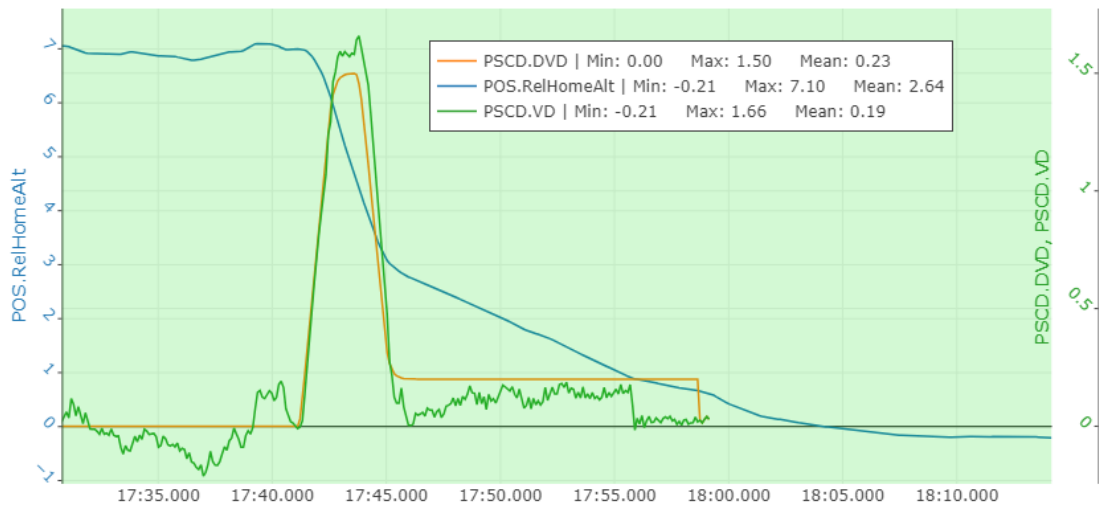


Figura 3.8. ArduPilot – Altitud Relativa y Velocidad vertical en el tiempo [Fuente propia]

Adicionalmente, en la Figura 3.9. se grafican distintas variables del GPS como lo son: el número de satélites (GPS.NSats), la precisión de la posición vertical (GPA.VAcc), la precisión de la posición horizontal (GPA.HAcc) y el GPS Fix (GPS.Status).

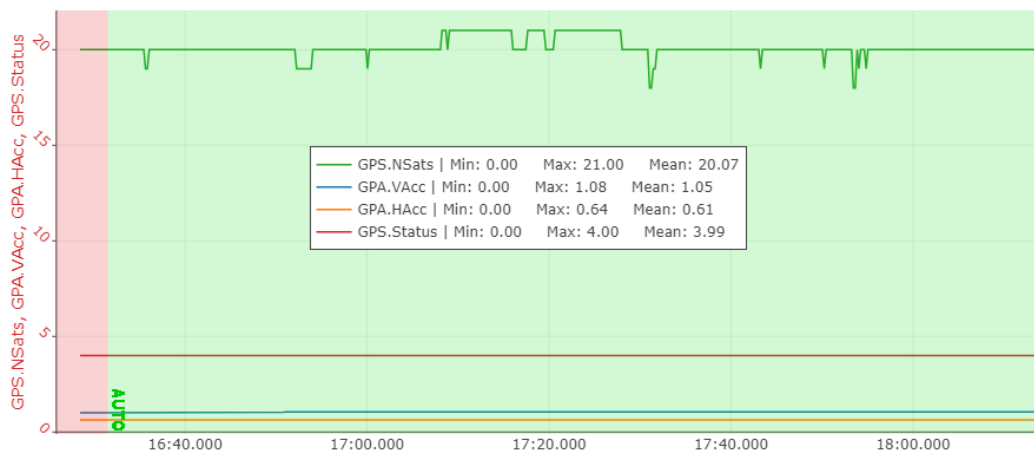


Figura 3.9. ArduPilot – Variables GPS [Fuente propia]

El número de satélites debe ser mayor a 12, en este caso tiene un promedio de 20 satélites. La precisión de la posición horizontal debe ser menor a 1 [m] y la de la vertical menor a 2 [m], lo cual también se cumple siendo en promedio 0.64 [m] y 1.08 [m] respectivamente. El GPS Fix, al estar en el número 4 indica que la técnica que utiliza para determinar la ubicación del UAV es GPS + Dead Reckoning. Dado que todos los parámetros se encuentran en valores adecuados, los datos obtenidos por el GPS son certeros y confiables.

Con el propósito de analizar el consumo de energía durante la misión se presenta la Figura 3.10. donde se muestra el nivel de la batería en [V] y la cantidad de descarga en [uAh]. Se

observa que al empezar la misión la batería disminuye hasta más o menos un valor de 10 [V], lo cual ocurre debido a que los motores se encuentran activos. Además, se observa que la cantidad de descarga es de aproximadamente 1[uAh].

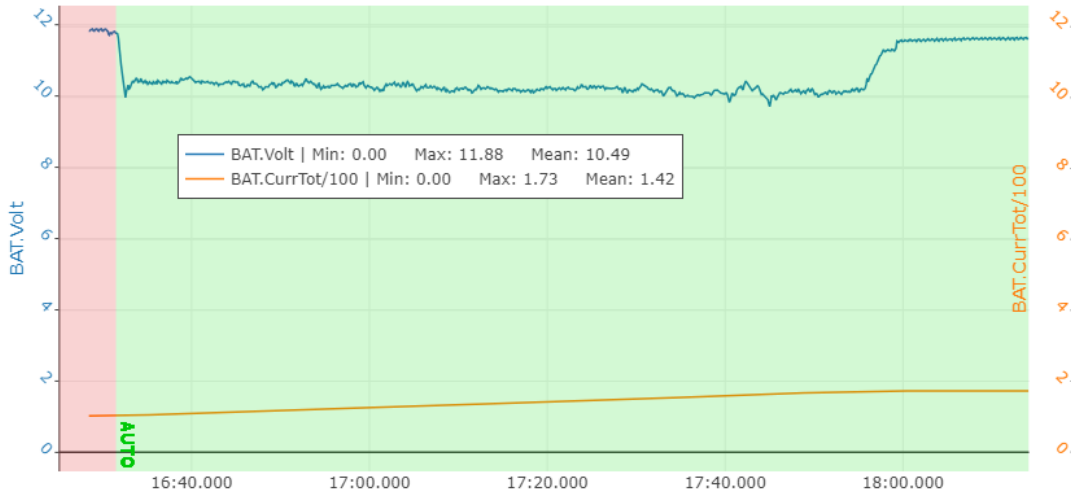


Figura 3.10. ArduPilot – Voltaje y consumo de la batería [Fuente propia]

3.1.3 MISIÓN DE VUELO AUTÓNOMO: PX4 Y QGROUNDCONTROL

En el caso de PX4 y QGroundControl se siguió el mismo proceso que en el caso anterior, cargando el firmware alternativo en el autopiloto mediante la estación de control QGroundControl. De forma análoga, se realizaron tres misiones autónomas con los puntos que se encuentran en la Tabla 3.3 formando una S digital, tomando en cuenta que las coordenadas del punto 1 corresponden a la ubicación de despegue del cuadricóptero, y es igual al punto 7 como se explicó para la opción 1. El UAV mantendrá una altitud aproximada de 7 [m] durante la misión. Todo esto se realizará en el modo de vuelo Mission y el último punto en modo Return (RTL).

Tabla 3.3. PX4 – QgroundControl Coordenadas para S digital

| N | Tipo | Latitud [°] | Longitud [°] | Altitud [m] |
|---|----------|-------------|--------------|-------------|
| 1 | Despegue | -0.2116877 | -78.4888186 | 7 |
| 2 | Waypoint | -0.211589 | -78.4889491 | 7 |
| 3 | Waypoint | -0.2117191 | -78.4890746 | 7 |
| 4 | Waypoint | -0.2118372 | -78.4889212 | 7 |
| 5 | Waypoint | -0.2120102 | -78.4890263 | 7 |
| 6 | Waypoint | -0.2118839 | -78.4891815 | 7 |
| 7 | Return | -0.2116877 | -78.4888186 | 7 |

El análisis se realizará para una de las misiones realizadas, sin embargo, las otras dos misiones autónomas se presentan en el Anexo II.

Los puntos para la misión se colocaron en QGroundControl en la ventana PLAN como se muestra en la Figura 3.11. y se cargaron en el autopiloto.



Figura 3.11. QGroundControl – Coordenadas S digital [Fuente propia]

Con el fin de analizar los datos de las misiones, se guardaron los respectivos logs de vuelo cuya extensión es ulog, los cuales son procesados mediante la herramienta web “Flight Review” propia de PX4 [38]. Esta herramienta proporciona gráficas preestablecidas de variables de interés para un correcto análisis del estado de vuelo del cuadricóptero. Además, posee una sección para observar la gráfica en 3D de la trayectoria que siguió el UAV como se observa en la Figura 3.12. Además, la herramienta Flight Log Analyzer de Matlab [39] permite procesar los archivos ulog para poder realizar las gráficas de interés o incluso exportar los datos en un archivo .mat para luego emplearlos, por ejemplo en Excel, para generar las respectivas figuras. Por facilidad, esta opción es la que se utilizó.



Figura 3.12. PX4 – S digital 3D en Flight Log Review [Fuente propia]

De igual manera que con ArduPilot y Mission Planner, se realiza el gráfico de la posición X vs Y (Longitud vs Latitud) de la Figura 3.13 para comparar la trayectoria esperada con la trayectoria obtenida de acuerdo a los puntos establecidos previamente. Como se mencionó, se toma como punto de origen o home (0,0) a la ubicación inicial del cuadricóptero. Se observa que el UAV se aproxima bastante a los waypoint establecidos, y que la trayectoria que sigue es similar a la esperada.

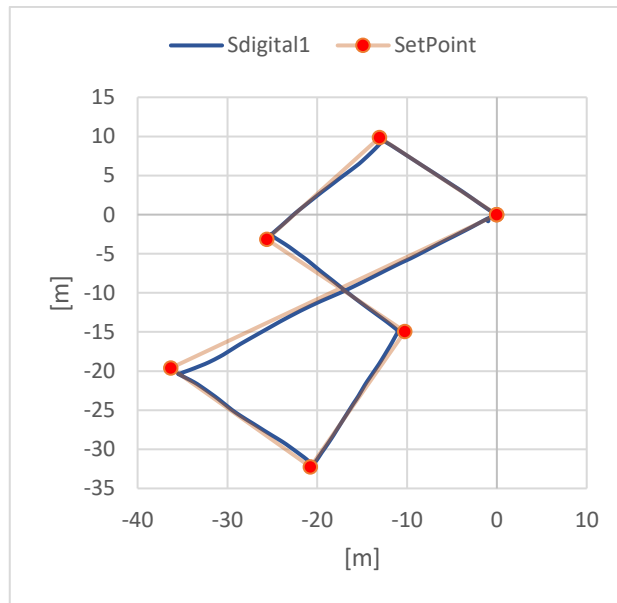


Figura 3.13. PX4 – Trayectoria S digital [Fuente propia]

Esto debido a que su comportamiento es que desde que inicia primero gira su frente hacia el siguiente waypoint y después avanza, por lo que siempre se asegura de aproximarse al mismo lo suficiente para poder continuar con el siguiente. Esto se encuentra en el parámetro MPC_YAW_MODE configurado como Towards waypoint (yaw first)

Ahora, las coordenadas de latitud y longitud se trasladan a coordenadas en X y Y tomando como punto de origen la posición inicial del UAV, y se calculan los errores relativos entre SetPoint y los puntos más cercanos a los que llega el UAV. Se presenta en la Tabla 3.4. las coordenadas y el cálculo de los errores relativos correspondientes, exceptuando los puntos 1 y 7 (home). Se observa que en su mayoría los errores son menores al 7%, siendo los valores más altos de error 10.51% y 6.92% y su error más bajo del 0.07%. Además, el promedio de los errores es de 10.12% en el eje X y de 10.93% en el eje Y, lo cual es aceptable y respalda lo mencionado anteriormente.

Tabla 3.4. PX4 Errores Relativos – S digital

| Coordenada Setpoint | | Setpoint | | Medido | | Errores Relativos | |
|-------------------------------------|------------|----------|--------|--------|--------|-------------------|---------|
| Longitud[°] | Latitud[°] | x[m] | y[m] | x[m] | y[m] | EX% | EY% |
| -78.4888186 | -0.211688 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| -78.4889491 | -0.211589 | -13.05 | 9.87 | -12.52 | 9.64 | 4.06 % | 2.33 % |
| -78.4890746 | -0.211719 | -25.6 | -3.14 | -24.91 | -2.81 | 2.70 % | 10.51 % |
| -78.4889212 | -0.211837 | -10.26 | -14.95 | -10.97 | -14.94 | 6.92 % | 0.07 % |
| -78.4890263 | -0.21201 | -20.77 | -32.25 | -20.63 | -31.85 | 0.67 % | 1.24 % |
| -78.4891815 | -0.211884 | -36.29 | -19.62 | -34.29 | -19.9 | 5.51 % | 1.43 % |
| -78.4888186 | -0.211688 | 0 | 0 | 0.13 | -0.11 | - | - |
| Promedio de errores en X y Y | | | | | | 10.12 % | 10.93 % |

Por otro lado, se realiza la gráfica de la altitud relativa a al punto de origen en función del tiempo, que se presenta en la Figura 3.14; para verificar que durante la misión el UAV mantiene una altura alrededor de los 7[m]. Se observa que efectivamente el cuadricóptero aumenta progresivamente su altura hasta el valor establecido, e intenta mantener esa altura con un valor promedio de 6.93 [m] y una desviación estándar de 0.094 [m]. Finalmente, al momento del aterrizaje empieza a disminuir su altitud hasta llegar a los 0[m] aproximadamente.

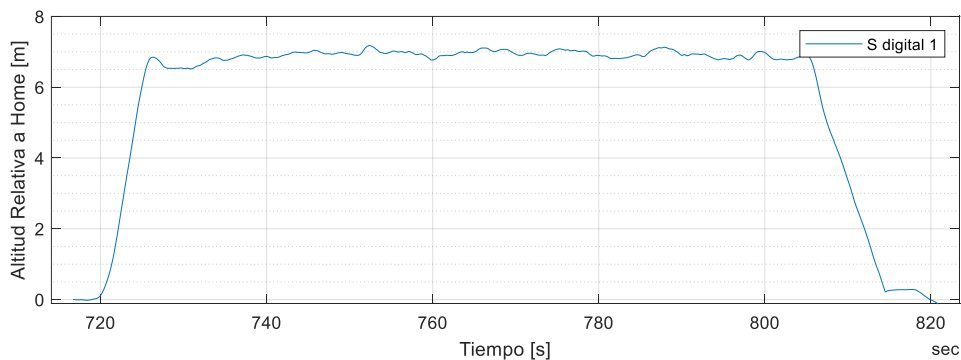


Figura 3.14. PX4 – Altitud Relativa en el tiempo [Fuente propia]

En la Figura 3.15 se grafica la altitud relativa a home y la velocidad vertical en función del tiempo del último tramo de la misión donde el UAV realiza el aterrizaje. En el parámetro MPC_LAND_ALT1 se determinó que la altitud para el primer paso de aterrizaje lento es de 7 [m], para el segundo paso 5 [m] (MPC_LAND_ALT2) y para el último paso 1 [m] (MPC_LAND_ALT3). En la Figura 3.15 se observa que esto se cumple, ya que para empezar el aterrizaje a los 7 [m] la velocidad vertical máxima del dron llega hasta los 1.1 [m/s]. Tanto la velocidad como la altitud empiezan a descender hasta más o menos los 5

[m], donde su velocidad trata de establecerse en un valor de tasa de descenso de 0.7 [m/s] configurado en el parámetro MPC_LAND_SPEED. Se mantiene en dicho valor de velocidad y continúa bajando su altitud hasta más o menos el 1 [m], donde disminuye nuevamente su velocidad hasta 0.1 [m/s]. Cabe resaltar que los valores de velocidad de 1.1 [m/s] y 0.1 [m/s] no fueron configurados, sino que el firmware PX4 realiza individualmente sus cálculos para determinar la mejor tasa de descenso en función de la tasa establecida en MPC_LAND_SPEED.

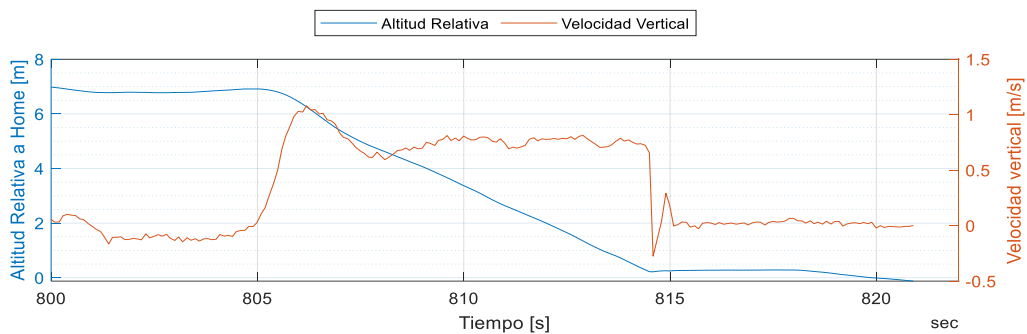


Figura 3.15. PX4 – Altitud Relativa y Velocidad vertical en el tiempo [Fuente propia]

Adicional, en la Figura 3.16. se grafican distintas variables del GPS como lo son: la precisión de la posición horizontal en [m], la precisión de la posición vertical en [m], el número de satélites usados, y el GPS Fix.

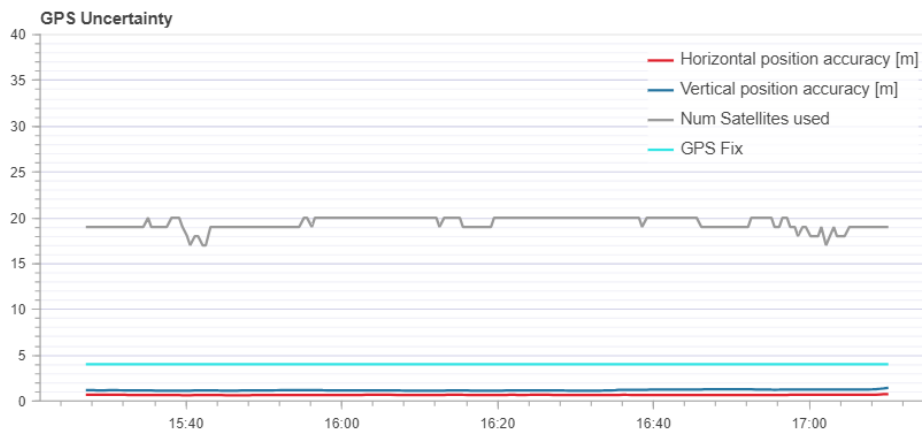


Figura 3.16. PX4 – Variables GPS [Fuente propia]

El número de satélites debe ser mayor a 12, en este caso tiene un promedio de 20 satélites. La precisión de la posición horizontal debe ser menor a 1 [m] y la de la vertical menor a 2 [m], lo cual también se cumple. El GPS Fix, al estar en el número 4 indica que la técnica que utiliza para determinar la ubicación del UAV es GPS + Dead Reckoning. Dado que

todos los parámetros se encuentran en valores adecuados, los datos obtenidos por el GPS son certeros y confiables.

Con el propósito de analizar el consumo de energía durante la misión se presenta la Figura 3.17. donde se muestra el voltaje de la batería real y filtrado en [V] y la cantidad de descarga [uAh]. Se observa que al empezar la misión la batería disminuye hasta más o menos un valor de 10.4 [V], lo cual ocurre debido a que los motores se encuentran activos. Además, se observa que la cantidad de descarga es de aproximadamente 1[uAh].

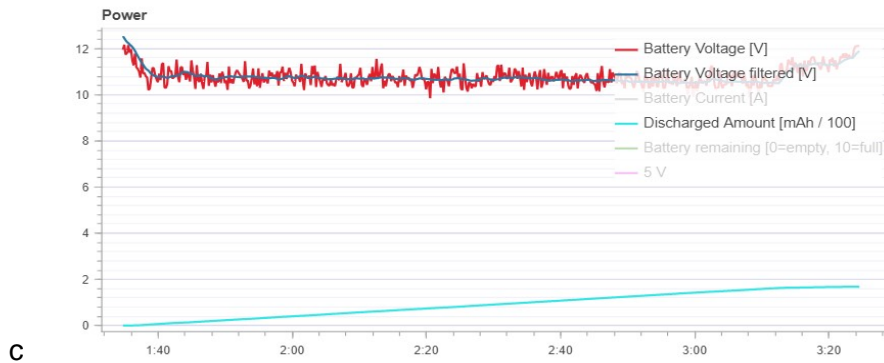


Figura 3.17. PX4 – Voltaje y consumo de la batería [Fuente propia]

3.1.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

De los datos obtenidos mediante telemetría en las estaciones de control en tierra y de acuerdo al análisis realizado previamente para cada una de las opciones: ArduPilot + Mission Planner y PX4 + QGroundControl, se realizará una comparación entre los resultados obtenidos. En la Tabla 3.5. se presentan una comparación entre los errores relativos obtenidos para las coordenadas en X y Y tanto para ArduPilot como para PX4.

Tabla 3.5. Errores Relativos – ArduPilot vs PX4

| WayPoint | Errores Relativos ArduPilot | | Errores Relativos PX4 | | |
|-------------------------|-----------------------------|---------|-----------------------|---------|---------|
| | Nº | EX% | EY% | EX% | EY% |
| 2 | | 5.08 % | 16.05 % | 4.06 % | 2.33 % |
| 3 | | 6.45 % | 4.44 % | 2.70 % | 10.51 % |
| 4 | | 7.33 % | 10.58 % | 6.92 % | 0.07 % |
| 5 | | 9.27 % | 1.93 % | 0.67 % | 1.24 % |
| 6 | | 7.90 % | 1.53 % | 5.51 % | 1.43 % |
| Promedio Errores | | 16.42 % | 19.88 % | 10.12 % | 10.93 % |

Tomando en cuenta que en ambos casos se realizaron las misiones a la misma velocidad horizontal, se observa que PX4 presenta una reducción del error del 6.30% en X y 8.95% en Y, en comparación con ArduPilot. Por consiguiente, PX4 presenta mayor precisión al

momento de llegar a los puntos de waypoint establecidos. En el caso de PX4 el parámetro MPC_YAW_MODE configurado como Towards waypoint (yaw first) es el que permite que el UAV primero llegue al punto, luego gire para mirar al siguiente punto y avance, en cambio en ArduPilot el parámetro WP_YAW_BEHAVIOR se configuró como Face next waypoint except RTL ya que es la más similar al comportamiento que se esperaba obtener. Sin embargo, en ArduPilot el cuadricóptero gira y avanza a la par que se aproxima al siguiente punto. En la Figura 3.18 se observa que ambas misiones duran 100 segundos, siendo ArduPilot el que empieza el aterrizaje antes que PX4 dado que se ahorra el tiempo de parar en cada waypoint, a diferencia de PX4 que se demora más porque pasa por cada uno de los puntos definidos.

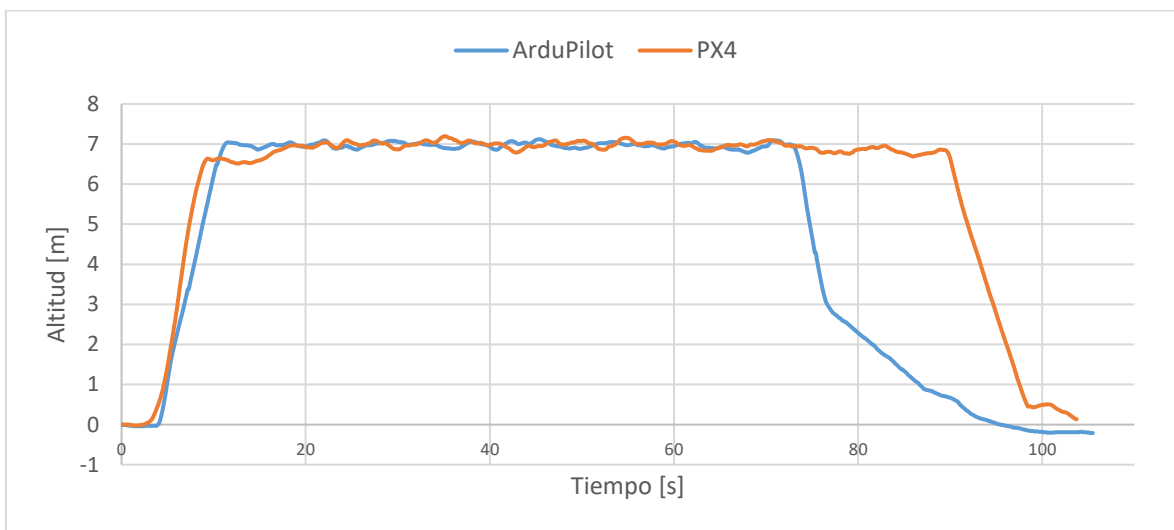


Figura 3.18. ArduPilot y PX4 – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

Por otro lado, como se observa en la Figura 3.18, con ambas opciones se tiene un excelente control de altitud con valores de altitud promedio y desviación estándar que se presentan en la Tabla 3.5. Se observa que en este caso, ArduPilot presenta un control de altitud ligeramente mejor que PX4, con una diferencia de altitud promedio de 0.04 [m]; y una menor desviación estándar, con una diferencia de 0.028 [m]. Dado que la diferencia entre los valores de altitud promedio y desviación estándar son mínimos, se puede decir que con ambas opciones se tiene un excelente control de altitud.

Tabla 3.5. Altitud promedio y desviación estándar – ArduPilot vs PX4

| Altitud | ArduPilot | PX4 |
|---------------------|-----------|-----------|
| Promedio | 6.97 [m] | 6.93 [m] |
| Desviación Estándar | 0.066 [m] | 0.094 [m] |

En cuanto al aterrizaje, PX4 posee 3 niveles de paso de descenso para el momento de aterrizar con solo un valor de velocidad de descenso de 0.7 [m/s] que se va adaptando a cada uno de dichos niveles. En cambio, ArduPilot solo tiene un nivel de paso de descenso y un valor de velocidad de descenso de 0.3 [m/s] a partir de los 3[m], valor que se colocó por precaución y para asegurar la integridad del UAV. En el caso de ArduPilot el aterrizaje tarda mucho más tiempo que en PX4 que es mucho más rápido.

Tanto en PX4 como en ArduPilot la velocidad medida correspondía a la velocidad configurada. Además, todos los datos obtenidos son confiables debido a las gráficas de los GPS presentadas. Finalmente, en cuanto al voltaje de la batería y el consumo para ambas opciones el voltaje disminuía durante la misión y volvía a su valor normal al aterrizar, y consumen aproximadamente 1[uAh], en ambos casos.

3.1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Los parámetros de PX4 resultan mucho más fácil y rápidos de configurar debido a la interfaz intuitiva de QGroundControl. Todo se realiza en la ventana de "Vehicle Setup", la cual presenta los estados y distintas pestañas de lo más importante a configurar. Por ejemplo, en primera instancia la instalación de un firmware y selección de un airframe, segundo la calibración de los distintos sensores: compass, giroscopio, acelerómetro, nivel y orientaciones del autopiloto y GPS; y la calibración del radio control. Posteriormente se encuentran la selección de modos de vuelo, configuración de la batería, test de motores, configuración de parámetros de seguridad y como última opción se encuentran los parámetros, los cuales se configuran adicional a lo mencionado previamente. Entre ellos se configuraron la velocidad horizontal durante las misiones, se habilitó que se puedan armar los motores con un gesto del radio control y se configuró el comportamiento del dron durante una misión para continuar con el siguiente waypoint.

En ArduPilot la configuración de parámetros es más compleja debido a que la interfaz de Mission Planner es un más antigua y menos intuitiva, aunque de igual manera que en QGroundControl las configuraciones principales se realizan en la ventana "Setup". En esta se elige el airframe; se calibran el acelerómetro, compass, radio y ESCs; y se realiza el test de motores. Adicional se presenta una opción de "Initial Tune Parameters" donde se realiza la configuración de la batería, sin embargo, como se mencionó anteriormente, utilizando esta opción el UAV durante las pruebas manuales presentaba inestabilidad y un problema de consideración con el throttle al momento de bajar el dron levemente, lo que ocasionó un aterrizaje muy brusco. Es por ello que es preferible configurar los parámetros uno por uno

en la ventana de “Config”, donde se establecieron las velocidades horizontales de los modos de vuelo Loiter, Mission, RTL; las velocidades verticales de los modos de vuelo Mission y Land; la altura mínima a la que el UAV subirá antes de hacer un RTL; el ángulo máximo de inclinación en todos los modos de vuelo. Como es evidente, para la opción ArduPilot + Mission Planner hay que buscar uno por uno los parámetros de interés y no existe una ventana donde se encuentren los parámetros más importantes a configurar, como sí es el caso para PX4 + QGroundControl. Además, en Mission Planner no existe una ventana específica de parámetros de seguridad, y aunque sí se pueden buscar y setear estos parámetros, se los ha dejado en sus valores por defecto.

De acuerdo a lo mencionado se puede decir que QGroundControl posee una interfaz más intuitiva y permite una fácil configuración de los parámetros de PX4; a diferencia de Mission Planner, cuya interfaz es antigua y la configuración de parámetros es tediosa. Además de que el firmware ArduPilot presenta todavía ciertos errores que se continúan corrigiendo en cada nueva versión de firmware que se libera. En el caso de PX4 solo fue necesario cargar el firmware una vez y no se tuvo ningún inconveniente.

En las misiones de vuelo automáticas realizadas, se observó que PX4 se aproximaba mucho más a las coordenadas de waypoint designados a diferencia de ArduPilot. Esto debido a distintos factores como por ejemplo que ArduPilot no tiene la opción de primero girar y luego avanzar, mientras que PX4 sí la tiene. Por otro lado, el nivel de batería consumido y la energía consumida durante la misión es similar con ambas opciones, y tienen un buen control de altitud. Respecto al aterrizaje, ArduPilot solo tiene un nivel de paso de descenso mientras que PX4 tiene tres. Ambos poseen una buena velocidad que corresponde a los parámetros establecidos en ambos casos.

Respecto a las herramientas de análisis de datos disponibles, en el caso de PX4 la herramienta Flight Review proporciona una vista en 3D de la trayectoria, un gráfico X vs Y, y distintos gráficos preestablecidos que ahorran tiempo para analizar el estado de la misión, aunque tiene la desventaja de que no permite añadir otras variables de interés para el análisis; pero se puede utilizar la herramienta Flight Log Analyzer de Matlab para exportar los datos a un archivo .mat y tener la libertad de realizar las gráficas de interés. En cambio, ArduPilot posee la herramienta UAV Flight Log Viewer, que proporciona una vista en 3D de la trayectoria, y la posibilidad de realizar gráficos de cualquier variable de interés en función del tiempo, pero no posee la opción de un gráfico X vs Y. Existe la posibilidad de exportar los datos a un archivo CSV para poder realizar las gráficas de interés.

Finalmente, aunque como resultado se obtuvieron misiones manuales estables en ambos casos y misiones automáticas con resultados similares, en la opción alternativa PX4 + QGroundControl resultó más simple llegar a ese resultado ya que la configuración fue sencilla e intuitiva, y los errores presentados fueron mínimos. Por otra parte, con la opción ArduPilot + Mission Planner llevó más tiempo llegar a la configuración ideal, se presentaron muchos errores durante los vuelos manuales y automáticos que incluso ocasionaron daños físicos en el cuadricóptero, que posteriormente implicó cambiar algunos elementos como motores para poder estabilizar nuevamente a la aeronave.

Adicional a las pruebas realizadas, por recomendación del personal del proyecto de investigación, se realizaron para cada opción tres misiones de un triángulo que varía su altura, y que en el plano XY forma una línea recta. Los resultados de estas pruebas se presentan en el Anexo III, si se revisan las mismas se observará que se corrobora los resultados conseguidos con la S digital.

3.2 CONCLUSIONES

- Las aplicaciones de los UAVs en la actualidad van en aumento, existiendo misiones que se deben llevar a cabo en entornos con condiciones desfavorables, como es el caso del proyecto PIM-21-01 que emplea drones para monitoreo aéreo remoto de volcanes activos y ecosistemas altoandinos. Dado el costo y tiempo invertidos en los recursos del proyecto, es imprescindible obtener un UAV que tenga un sistema confiable de control que permita realizar el pilotaje a distancia de manera adecuada, para lo cual, uno de los aspectos importantes es el firmware del autopiloto y la estación de control a emplearse.
- La selección de un firmware alternativo debe considerar varias características, entre ellas ser compatible con el aiframe del UAV y su autopiloto, en este caso con un Quadrotor X que emplea un Pixhawk Cube Black. Además, ser de código abierto con documentación actualizada y licencia gratuita, mismas características para la estación de control alternativa que además debe ser compatible con el firmware elegido. Las dos opciones que cumplen con lo mencionado son: ArduPilot + Mission Planner, utilizada previamente; y la opción alternativa PX4 + QGroundControl.
- Para comparar de forma equitativa ambas opciones y realizar las pruebas pertinentes se implementó un cuadricóptero réplica, idéntico al utilizado en el proyecto de investigación, totalmente integrado con sus elementos fijos y en buen estado con las

adaptaciones necesarias para utilizar dos autopilotos. De este modo se evitan la mayor cantidad de errores y cambios al pasar de una opción a otra para la realización de misiones de vuelo equivalentes en condiciones similares.

- La instalación del firmware de PX4 se realizó tan solo una vez, mientras que la instalación de ArduPilot fue necesaria realizarla al menos tres veces a la versión más actual ya que presentaba ciertos errores de estabilidad, que se corregían instalando la versión más actual. Por otro lado, la configuración de los parámetros de cada firmware se realiza en base a las características del cuadricóptero replicado, con la ayuda de la estación de control en tierra.
- En el caso de PX4, la configuración de los parámetros resulta mucho más sencilla debido a la interfaz intuitiva de QGroundControl que tiene una ventana para cada una de las configuraciones y calibraciones más importantes, de modo que la cantidad de parámetros configurados individualmente es mínima. La calibración de los sensores presenta visualmente las acciones a realizar por lo que se cometen menos errores, y la configuración de los parámetros de seguridad se realiza en una ventana aparte.
- ArduPilot resultó más difícil de configurar en Mission Planner debido a su interfaz poco intuitiva, se tienen pocas ventanas que permitan configurar los parámetros más importantes de manera directa de modo que la cantidad de parámetros que se configuran uno por uno es considerable. Además, la calibración de los sensores no presenta visualmente las acciones a realizar por lo que se pueden cometer más errores, y sus parámetros de seguridad se dejaron seteados en sus valores por defecto. Por esto, con la opción ArduPilot + Mission Planner fue muy tardado llegar a la configuración ideal, se presentaron muchos errores durante los vuelos manuales y automáticos, lo cual incluso ocasionó daños físicos al UAV. Por lo cual, en el caso de PX4 se presentaron casi nulos problemas de configuración, mientras que con ArduPilot se tuvieron que cambiar constantemente los parámetros hasta llegar a estabilizar el UAV.
- Durante las misiones de vuelo equivalentes, manual y automática, realizadas para cada una de las opciones se evidenció para ambos casos un excelente control de altitud, una buena velocidad de aterrizaje acorde a los parámetros configurados, una disminución del voltaje y consumo de energía similar, y excelentes condiciones del estado del GPS de manera que los datos obtenidos mediante telemetría resultan confiables para su respectivo análisis.

- En cuanto a la precisión durante las misiones automáticas, con PX4 el UAV alcanzó con mayor precisión en alcanzar a los waypoint designados mediante QGroundControl, mientras que con ArduPilot el porcentaje de error entre las coordenadas seteadas mediante Mission Planner y las medidas fue mayor. Esto ocurre debido a que para PX4 se tiene la opción de que durante las misiones el dron gira para estar de frente al siguiente punto y luego avanza, a diferencia de con ArduPilot que solo tiene la opción de que gira para estar de frente al siguiente punto mientras se dirige hacia él.
- Al momento de regresar al punto de partida en el modo RTL, el seguimiento de la trayectoria en ambos casos resultó excelente con diferencias específicas al momento de aterrizar. En PX4 se tiene la opción de configurar tres niveles de pasos de descenso a una velocidad específica que se adapta a cada uno de esos niveles, mientras que en ArduPilot empieza el aterrizaje a una velocidad determinada por el parámetro de velocidad de descenso durante las misiones, y solo se tiene un nivel de paso de descenso a partir del cual cambia su velocidad. En ambos casos la velocidad medida es correcta y corresponde a los valores configurados mencionados previamente.
- Finalmente, ambas opciones presentaron resultados favorables al realizar misiones automáticas, una buena estabilidad, control de altura, velocidad horizontal y vertical adecuada a lo largo de la misión y al momento del aterrizaje. Sin embargo, llegar a dichos resultados resultó ser más simple con PX4 + QGroundControl, mientras que con ArduPilot + Mission Planner tomo un mayor tiempo, lo que se vio reflejado en que se presentaron varios errores y se puso en riesgo la integridad física del cuadricóptero.

3.3 RECOMENDACIONES

- Se recomienda en el caso de ArduPilot + Mission Planner realizar la configuración de los parámetros de la batería individualmente, dado que la ventana de configuración "Initial Tune Parameter" destinada para ese fin presenta errores.
- Para pilotos de drones experimentados que tengan un amplio conocimiento de la configuración de parámetros individualmente, se recomienda emplear cualquiera de las dos opciones PX4 + QgroundControl o ArduPilot + Mission Planner. Para pilotos de drones principiantes se recomienda emplear la opción alternativa, dado que presenta menores errores y su configuración es mucho más simple, rápida y amigable.

- Se recomienda siempre se verificar los movimientos antes de mandar una misión en modo automático para asegurarse que el UAV este 100% operativo y evitar inconvenientes durante las misiones.
- Se recomienda para futuras investigaciones de opciones de firmware más estación de control en tierra, probar la opción de ArduPilot + QGroundControl (lo cual también es una opción viable a testear) y realizar las pruebas manuales y automáticas respectivas con el fin de determinar la mejor opción.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Intermap Technologies, «UAVs Today: Where Are They?,» 6 Agosto 2019. [En línea]. Available: www.intermap.com/blog/uavs-today-where-are-they.
- [2] Escuela Politécnica Nacional, «Doctorado en Ciencias de la Mecánica: Líneas de Investigación,» [En línea]. Available: <https://doctoradomecanica.epn.edu.ec/es/investigacion/lineas-de-investigacion>. [Último acceso: 08 Enero 2023].
- [3] Escuela Politécnica Nacional, «Propuesta Proyecto de Investigación PIM-21-01,» Quito.
- [4] PX4 Dev Team, «Hex Cube Black Flight Controller,» [En línea]. Available: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk-2.html. [Último acceso: 08 Enero 2023].
- [5] CubePilot, «The Cube - Firmware Installation & Connection Troubleshooting,» [En línea]. Available: <https://docs.cubepilot.org/user-guides/autopilot/the-cube-series-firmware-and-connection-troubleshooting>. [Último acceso: 08 Enero 2023].
- [6] E. S. Loyaga Carranza, «Estudio, Desarrollo e Integración de Equipos Auxiliares para el Control y/o monitoreo de plataformas robóticas. Diseño e implementación de un prototipo auxiliar que envíe información a un autopiloto pixhawk enfocado a la aplicación de evasión de obstáculos,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [7] ArduPilot Dev Team, «The Cube Black,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-the-cube-overview.html>. [Último acceso: 10 Abril 2023].
- [8] TauLabs, «TauLabs,» [En línea]. Available: <https://github.com/TauLabs/TauLabs>. [Último acceso: 23 Abril 2023].
- [9] PX4 Dev Team, «Licencias PX4,» [En línea]. Available: <https://docs.px4.io/main/en/contribute/licenses.html>. [Último acceso: 23 Abril 2023].

- [10] PX4 Dev Team, «PX4 Autopilot User Guide (v1.9.0),» [En línea]. Available: <https://docs.px4.io/v1.9.0/en/>. [Último acceso: 08 Enero 2023].
- [11] PX4, «Open Source Autopilot for Drones - PX4 AutoPilot,» [En línea]. Available: <https://px4.io>. [Último acceso: 21 Noviembre 2022].
- [12] PX4, «Flight Modes,» [En línea]. Available: https://docs.px4.io/main/en/flight_modes/. [Último acceso: 21 Noviembre 2022].
- [13] ArduPilot Dev Team, «Licencia (GPLv3) Ardupilot,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/dev/docs/license-gplv3.html>. [Último acceso: 23 Abril 2023].
- [14] ArduPilot Dev Team, «ArduPilot,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org> . [Último acceso: 21 Noviembre 2022].
- [15] ArduPilot Dev Team, «Flight Modes,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/flight-modes.html>.
- [16] SPH Engineering, «UgCS,» [En línea]. Available: <https://www.ugcs.com>. [Último acceso: 26 Junio 2023].
- [17] SPH Engineering, «Supported Drones and Autopilots,» [En línea]. Available: https://www.ugcs.com/supported_drones_autopilots. [Último acceso: 23 Abril 2023].
- [18] Dronecode, «QGroundControl User Guide,» [En línea]. Available: <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/>. [Último acceso: 08 Enero 2023].
- [19] ArduPilot Dev Team, «Mission Planner Home,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/planner/index.html#mission-planner-home>. [Último acceso: 10 Abril 2023].
- [20] ArduPilot Dev Team, «Mission Planner Overview,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>. [Último acceso: 10 Abril 2023].
- [21] SPH Engineering, «Licencias UgCS,» [En línea]. Available: <https://shop.ugcs.com/es/pages/ugcs-license-types-pricing>. [Último acceso: 26 Junio 2023].
- [22] Geek Factory, «Rollo filamento PETG,» [En línea]. Available: <https://www.geekfactory.mx/tienda/impresoras-3d/rollo-filamento-petg-175mm-1kg/>. [Último acceso: 21 Junio 2023].
- [23] J. Chimarro y E. Pavón, «Integración de un sistema de control para el seguimiento de rutas de vuelo mediante GPS en un hexacóptero de monitoreo,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18992/1/CD-8389.pdf>. [Último acceso: 23 Abril 2023].
- [24] Dronecode, «QGroundControl,» [En línea]. Available: https://dev.px4.io/v1.11_noredirect/en/qgc/. [Último acceso: 30 Mayo 2023].

- [25] M. Lorenz, «SiK Radio,» 30 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://github.com/LorenzMeier/SiK>. [Último acceso: 26 Junio 2023].
- [26] ArduPilot Dev Team, «Configuring a Telemetry Radio using Mission Planner,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-configuring-a-telemetry-radio-using-mission-planner.html#common-configuring-a-telemetry-radio-using-mission-planner>. [Último acceso: 27 Junio 2023].
- [27] ArduPilot Dev Team, «Accelerometer Calibration,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-accelerometer-calibration.html>. [Último acceso: 27 Junio 2023].
- [28] ArduPilot Dev Team, «Radio Control Calibration,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-radio-control-calibration.html>. [Último acceso: 27 Junio 2023].
- [29] ArduPilot Dev Team, «Electronic Speed Controller (ESC) Calibration,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/esc-calibration.html>. [Último acceso: 27 Junio 2023].
- [30] ArduPilot Dev Team, «Power Monitor/Module Configuration in Mission Planner,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-power-module-configuration-in-mission-planner.html>. [Último acceso: 10 Julio 2023].
- [31] ArduPilot Dev Team, «Setting the Aircraft Up for Tuning,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/setting-up-for-tuning.html#setting-up-for-tuning>. [Último acceso: 27 Junio 2023].
- [32] Dronecode, «Sensor Setup (PX4),» [En línea]. Available: https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/SetupView/sensors_px4.html. [Último acceso: 21 Junio 2023].
- [33] PX4, «Flight Controller/Sensor Orientation,» [En línea]. Available: https://docs.px4.io/main/en/config/flight_controller_orientation.html. [Último acceso: 26 Junio 2023].
- [34] PX4, «Radio (Remote Control) Setup,» [En línea]. Available: <https://docs.px4.io/main/en/config/radio.html>. [Último acceso: 26 Junio 2023].
- [35] Dronecode, «Flight Modes Setup,» [En línea]. Available: <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/SetupView/FlightModes.html>. [Último acceso: 26 Junio 2023].
- [36] DroneCode, «PX4 Flight Modes Setup,» [En línea]. Available: https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/SetupView/flight_modes_px4.html. [Último acceso: 26 Junio 2023].
- [37] ArduPilot Dev Team, «UAV LogViewer,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/dev/docs/common-uavlogviewer.html>. [Último acceso: 15 Agosto 2023].

- [38] PX4, «Log Analysis using Flight Review,» [En línea]. Available: https://docs.px4.io/main/en/log/flight_review.html. [Último acceso: 15 Agosto 2023].
- [39] MathWorks, «Flight Log Analyzer,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/uav/ref/flightloganalyzer-app.html>. [Último acceso: 15 Agosto 2023].

5 ANEXOS

ANEXO I: Misiones S Digital: ArduPilot + Mission Planner

ANEXO II: Misiones S Digital: PX4 + QGroundControl

ANEXO III: Misión Triángulo

ANEXO IV: Enlaces

ANEXO I. Misiones S Digital: ArduPilot + Mission Planner

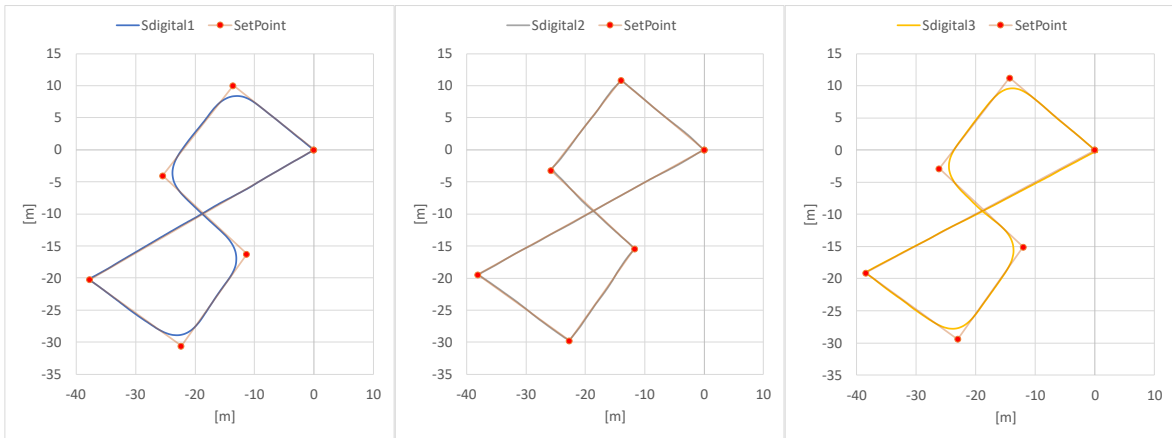


Figura I.1. ArduPilot – Trayectoria S digital [Fuente propia]

Tabla I.1. Errores Relativos de la trayectoria – ArduPilot

| WayPoint | Errores Relativos en X | | | Errores Relativos en Y | | | |
|-----------------|------------------------|--------------|-------------|------------------------|--------------|-------------|--------------|
| | Nº | EX1% | EX2% | EX3% | EY1% | EY2% | EY3% |
| 2 | | 16.05 | 0.00 | 14.45 | 5.08 | 0.29 | 0.21 |
| 3 | | 4.44 | 0.00 | 0.70 | 6.45 | 0.31 | 6.25 |
| 4 | | 10.58 | 0.06 | 0.20 | 7.33 | 0.43 | 13.92 |
| 5 | | 1.93 | 0.07 | 5.95 | 9.27 | 0.00 | 0.04 |
| 6 | | 1.53 | 0.00 | 0.05 | 7.90 | 0.13 | 0.26 |
| Promedio | | 19.88 | 0.09 | 15.64 | 16.42 | 0.61 | 15.26 |

S digital 1:

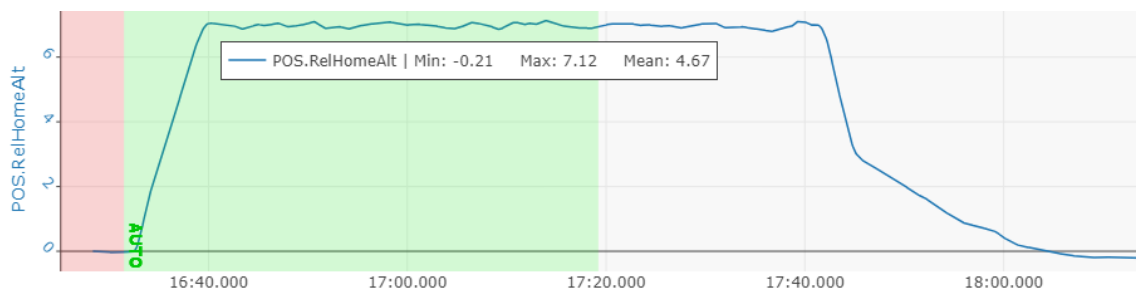


Figura I.2. ArduPilot – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

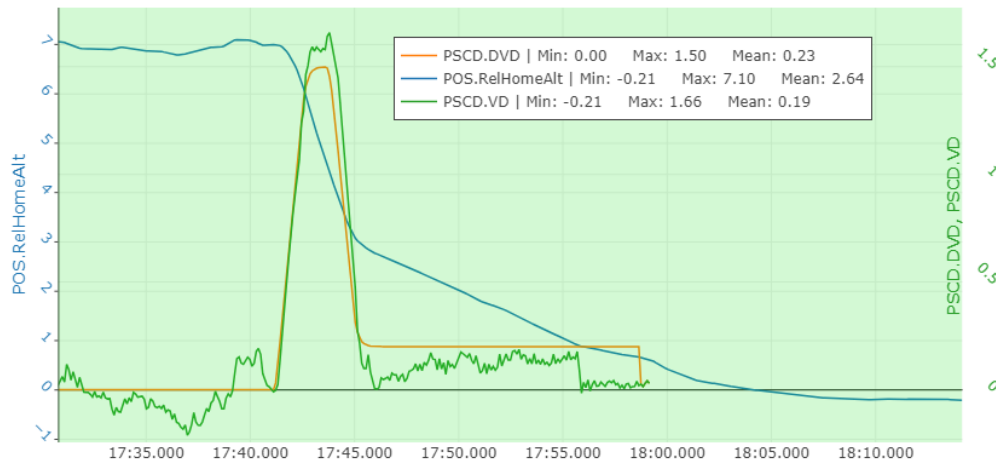


Figura I.3. ArduPilot – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

S digital 2:

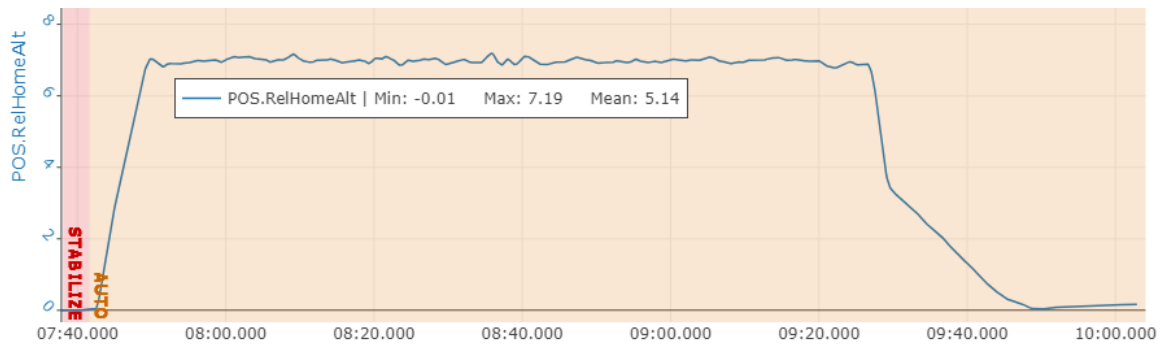


Figura I.4. ArduPilot – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

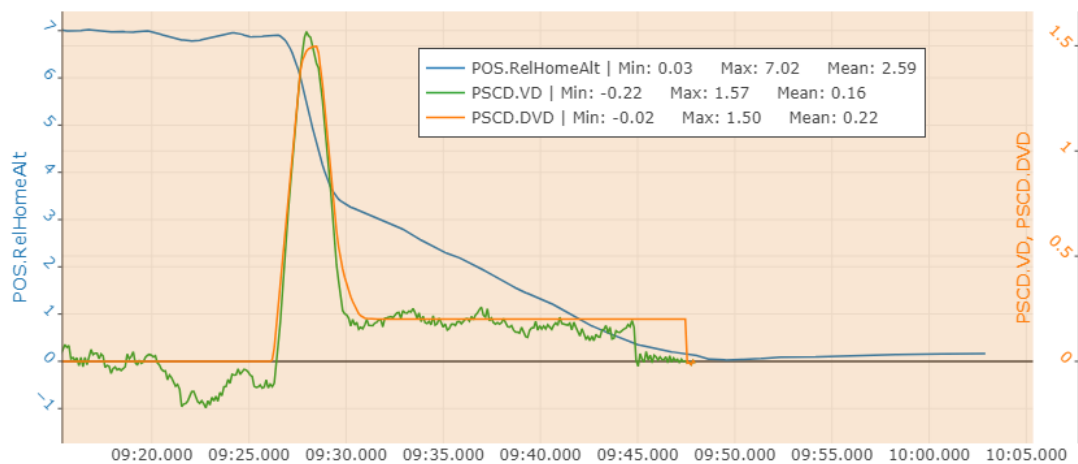


Figura I.5. ArduPilot – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

S digital 3:

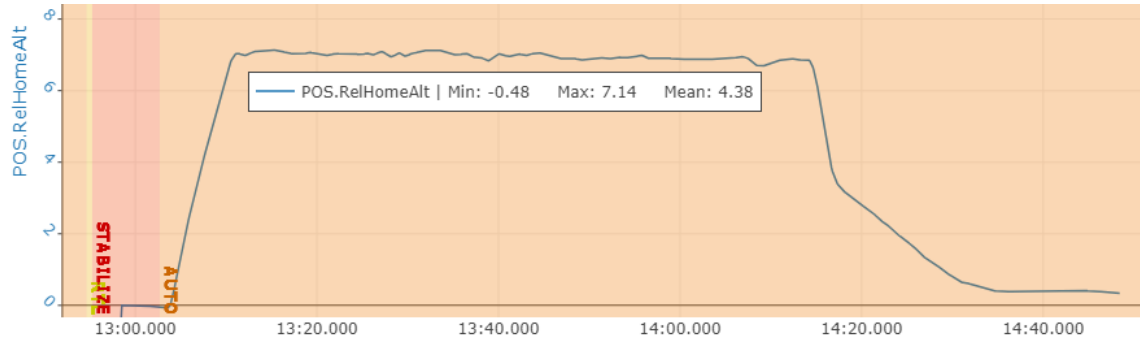


Figura I.6. ArduPilot – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

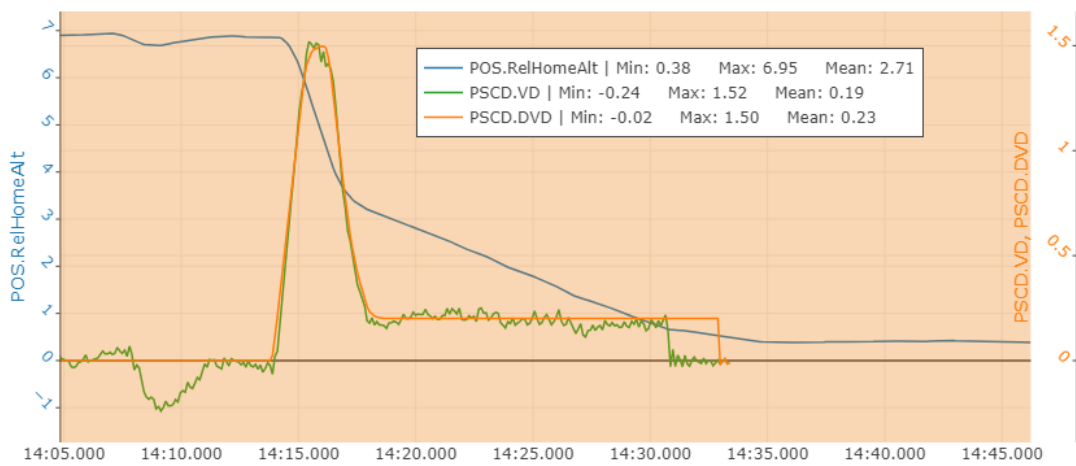


Figura I.7. ArduPilot – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

ANEXO II. Misiones S Digital: PX4 + QGroundControl

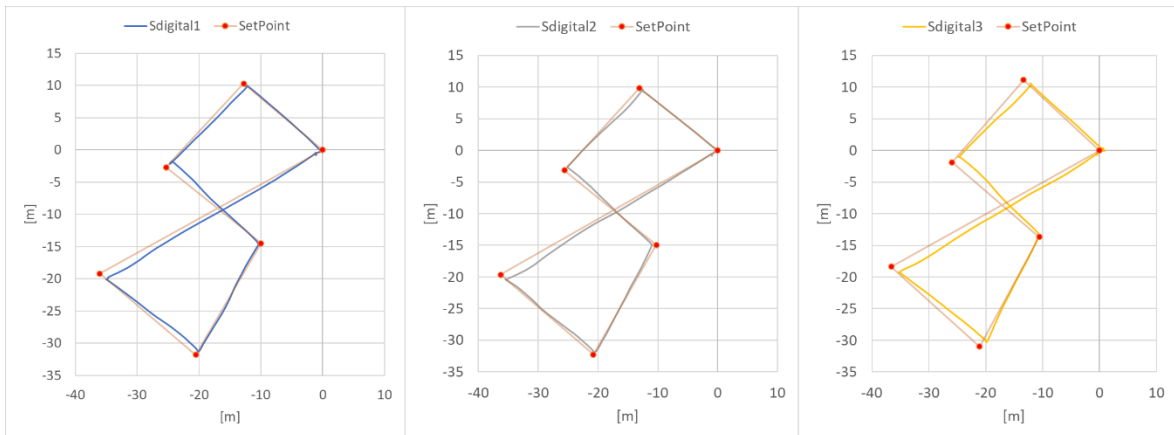


Figura II.1. PX4 – Trayectoria S Digital [Fuente propia]

Tabla II.1. Errores Relativos de la trayectoria – PX4

| WayPoint | Errores Relativos en X | | | Errores Relativos en Y | | |
|-----------------|------------------------|--------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|
| Nº | EX1% | EX2% | EX3% | EY1% | EY2% | EY3% |
| 2 | 2.81 | 2.33 | 4.31 | 2.74 | 4.06 | 8.59 |
| 3 | 13.06 | 10.51 | 10.11 | 6.48 | 2.70 | 8.79 |
| 4 | 0.35 | 0.07 | 0.29 | 5.11 | 6.92 | 0.09 |
| 5 | 1.86 | 1.24 | 2.13 | 1.17 | 0.67 | 5.64 |
| 6 | 4.23 | 1.43 | 3.38 | 3.47 | 5.51 | 4.97 |
| Promedio | 14.14 | 10.93 | 11.69 | 9.43 | 10.12 | 14.41 |

S digital 1:

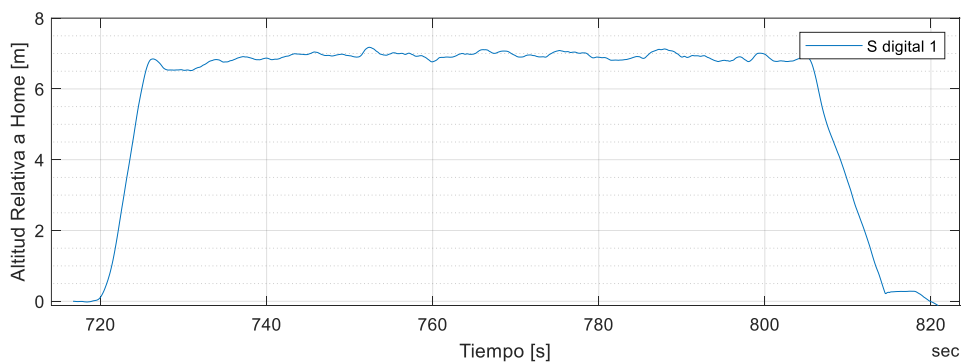


Figura II.2. PX4 – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

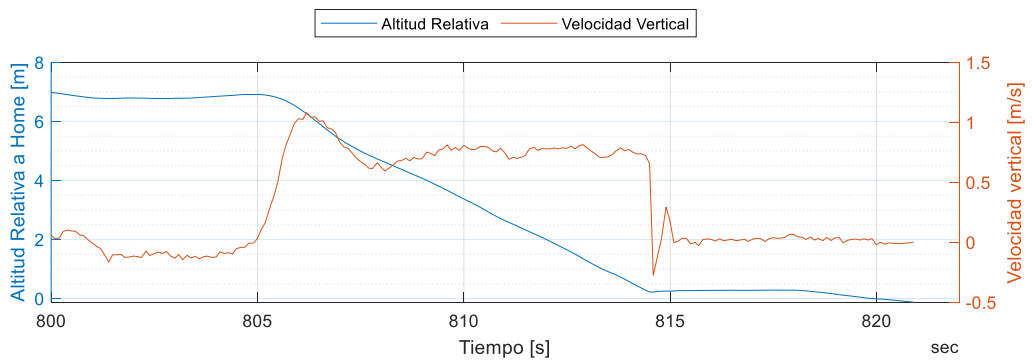


Figura II.3. PX4 – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

S digital 2:

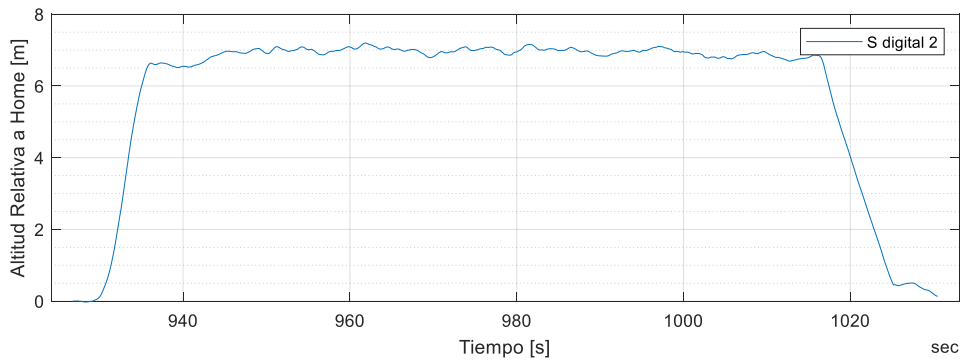


Figura II.4. PX4 – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

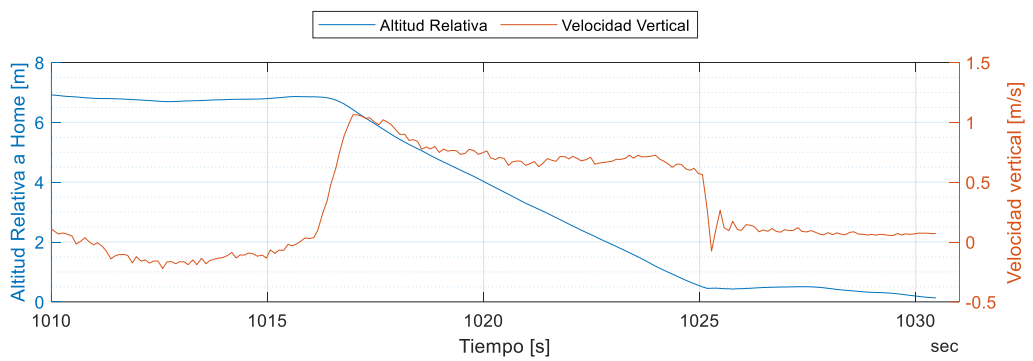


Figura II.5. PX4 – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

S digital 3:

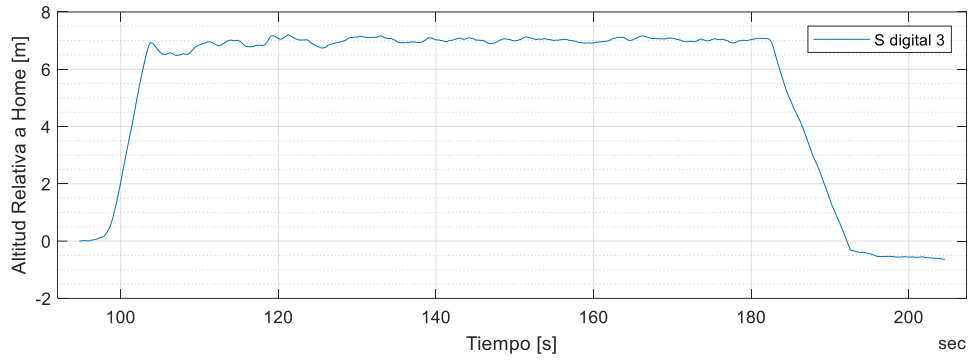


Figura II.6. PX4 – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

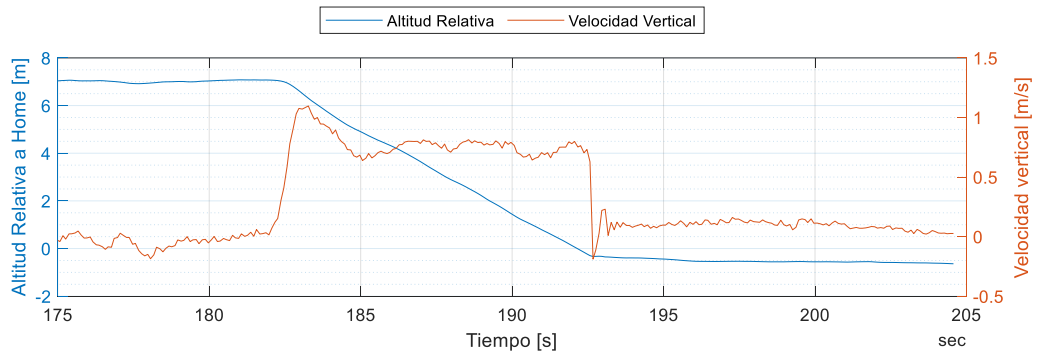


Figura II.7. PX4 – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

ANEXO III. Misión Triángulo

ARDUPILOT + MISSION PLANNER

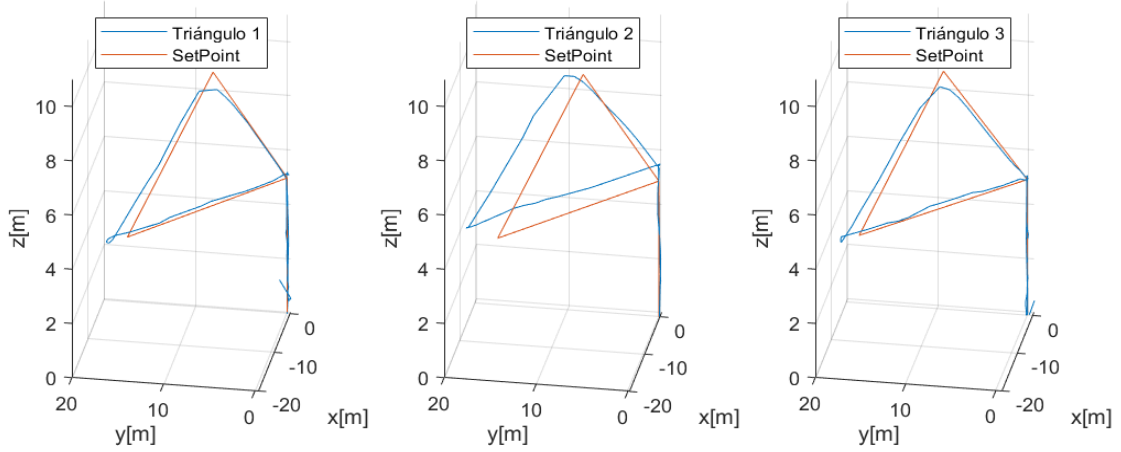


Figura III.1. ArduPilot – Trayectoria Triángulo en 3D [Fuente propia]

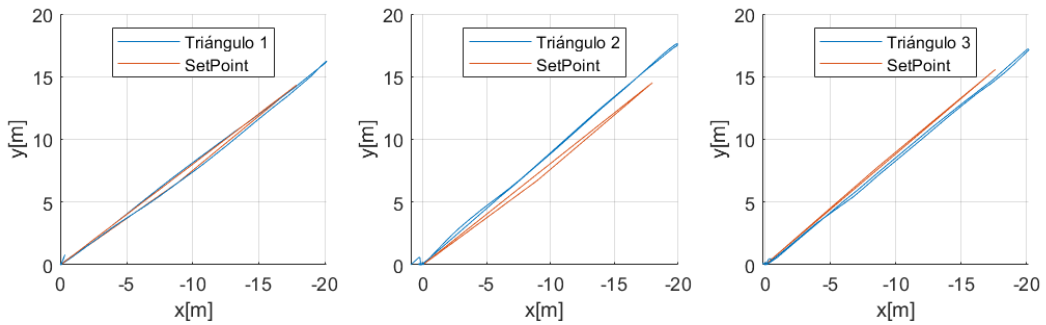


Figura III.2. ArduPilot – Trayectoria en el plano XY [Fuente propia]

Triángulo 1:

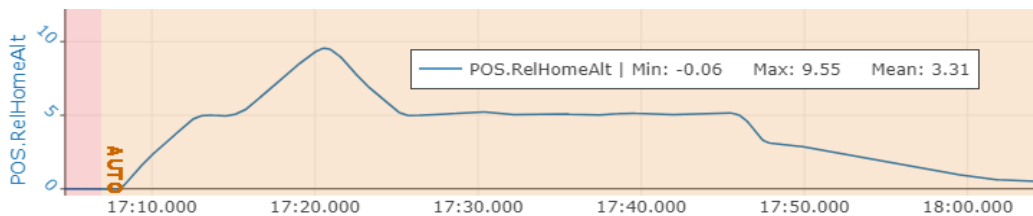


Figura III.3. ArduPilot – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

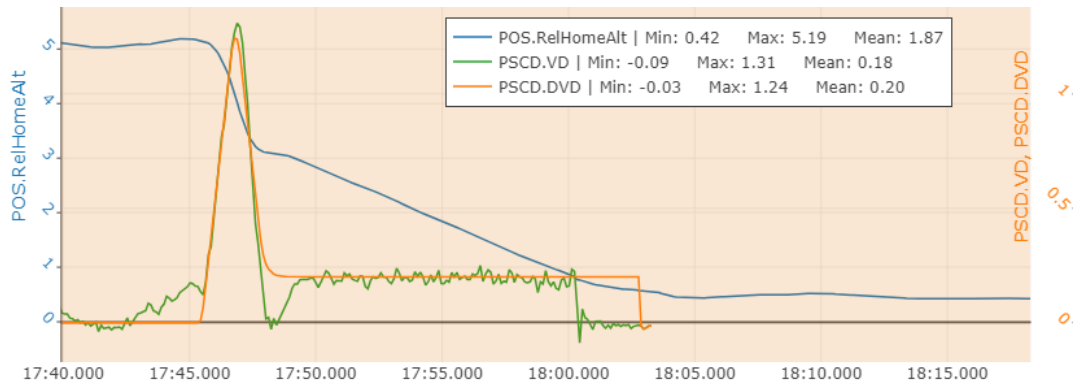


Figura III.4. ArduPilot – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

Triángulo 2:

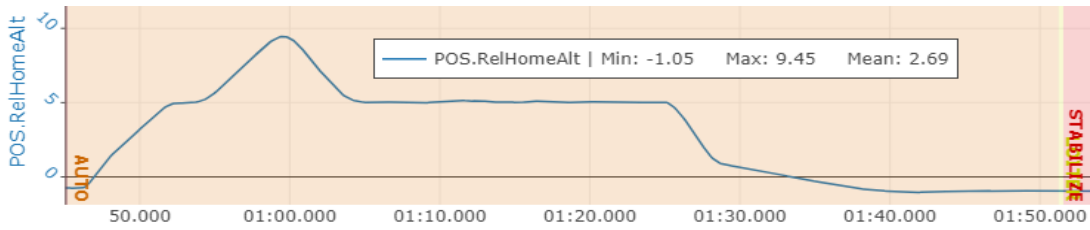


Figura III.5. ArduPilot – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

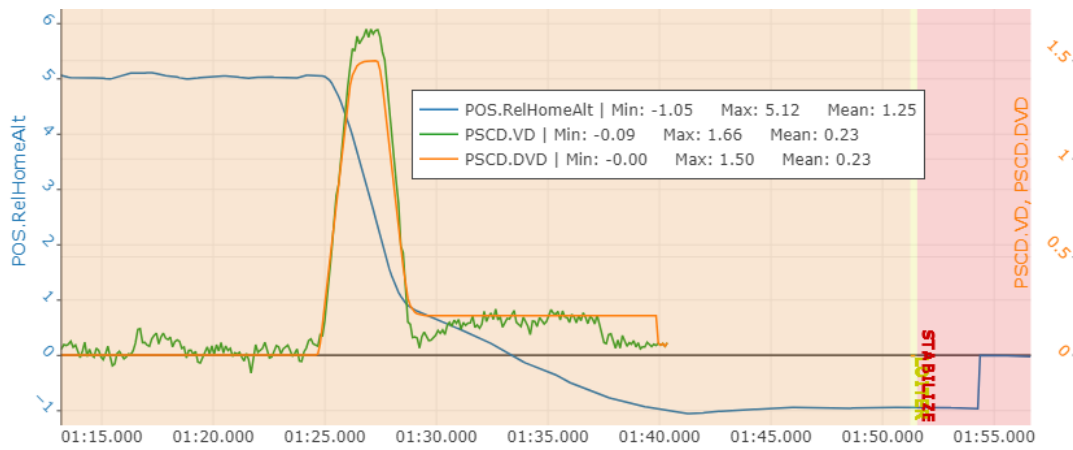


Figura III.6. ArduPilot – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

Triángulo 3:

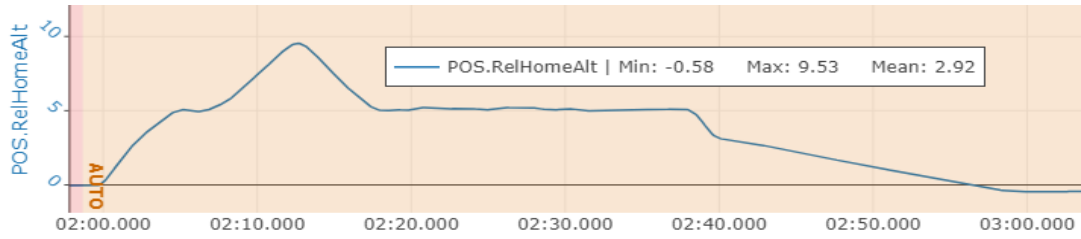


Figura III.7. ArduPilot – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

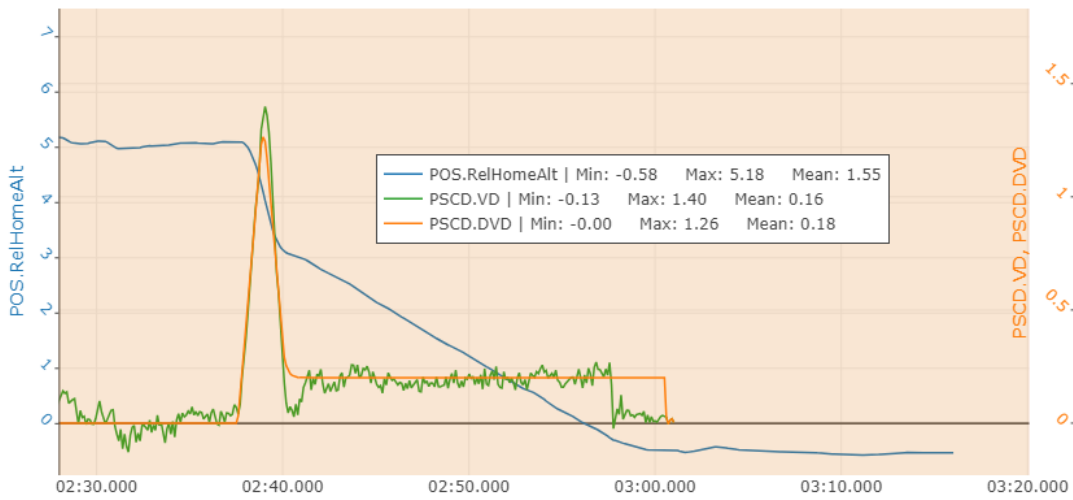


Figura III.8. ArduPilot – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

PX4 + QGROUNDCONTROL:

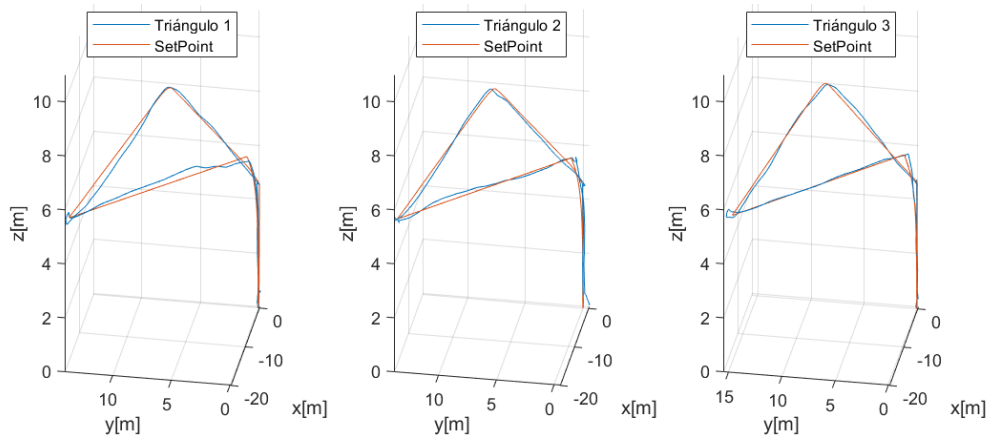


Figura III.9. PX4 – Trayectoria Triángulo en 3D [Fuente propia]

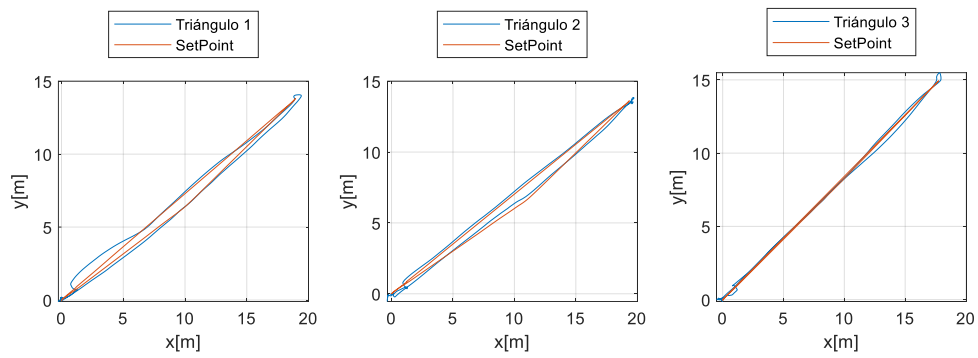


Figura III.10. PX4 – Trayectoria en el plano XY [Fuente propia]

Triángulo 1:

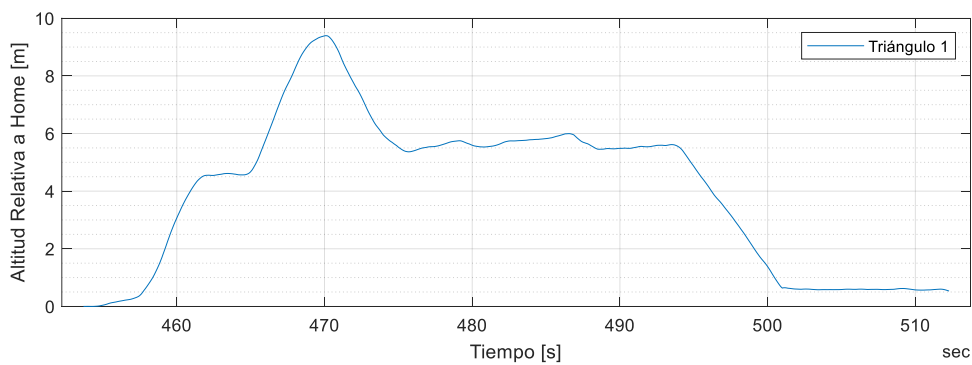


Figura III.11. PX4 – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

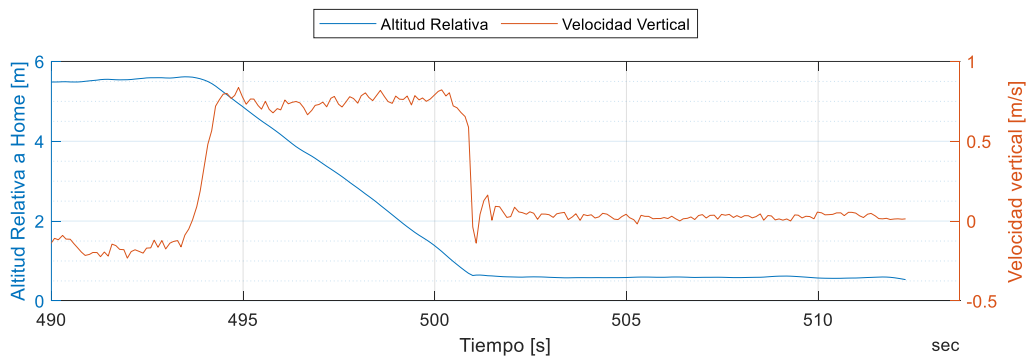


Figura III.12. PX4 – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

Triángulo 2:

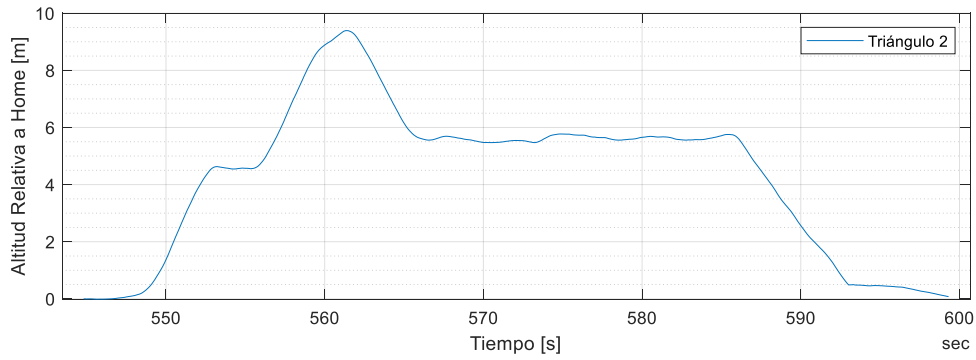


Figura III.13. PX4 – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

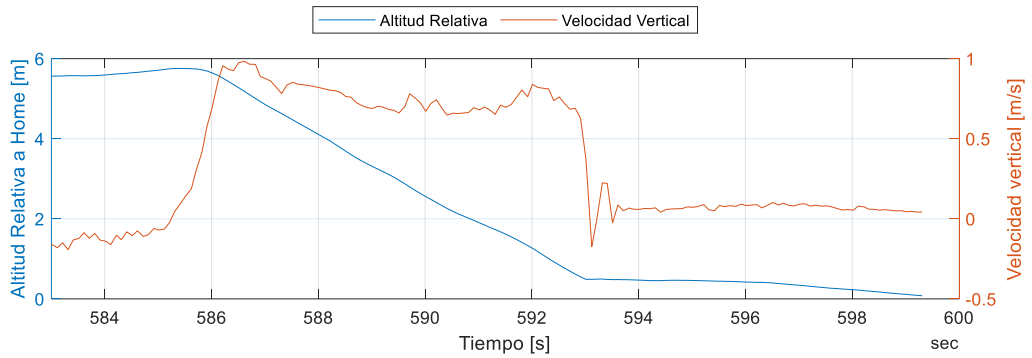


Figura III.14. PX4 – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

Triángulo 3:

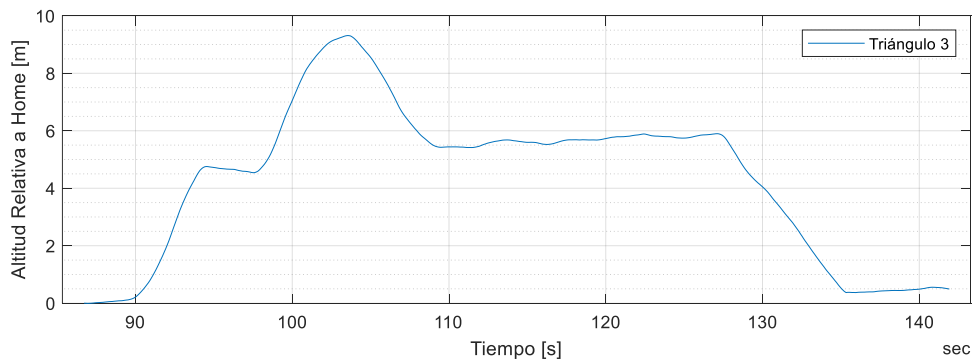


Figura III.15. PX4 – Altitud relativa en el tiempo [Fuente propia]

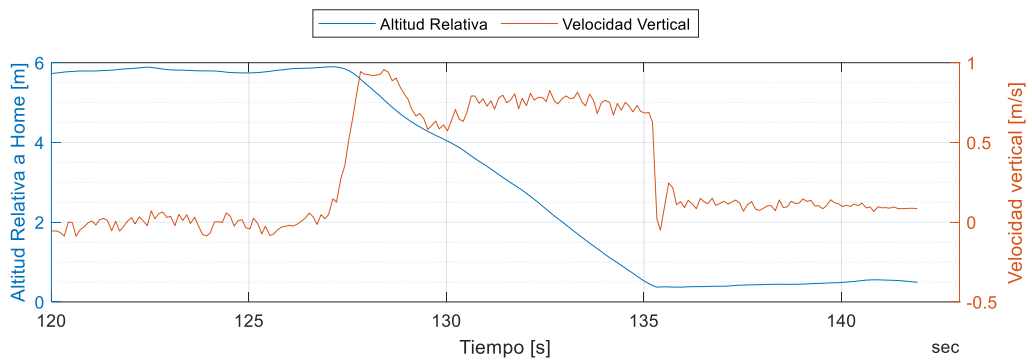


Figura III.16. PX4 – Altitud relativa y velocidad vertical durante aterrizaje [Fuente propia]

ANEXO IV. Enlaces

Carpeta compartida:

[KAROL_HIDALGO - TIC - TITD201 - GR3](#)