

**PLANTEAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
ELECTRÓNICO PARA TELEMETRÍA, NAVEGACIÓN Y CONTROL
PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE CUATRO ROTORES
DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA.**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Autor
Diego Fernando Gómez Otálora

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Telecomunicaciones**

Bogotá D.C. Febrero, 2023.

**PLANTEAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA
TELEMETRÍA, NAVEGACIÓN Y CONTROL PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO
TRIPULADO DE CUATRO ROTORES DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA.**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Autor

Diego Fernando Gómez Otálora, 20202373020,
dfgomezo@correo.udistrital.edu.co

Modalidad
Monografía

Presentado para optar al título de: Ingeniero en Telecomunicaciones

Director

Ing. Edgar Leonardo Gómez Gómez M.Sc.

Cotutor

ST. George Mauricio Ardila Marulanda

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Telecomunicaciones
Bogotá D.C. Febrero, 2023

Dedicatoria

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme el haber llegado hasta este momento el cual es muy importante en mi formación profesional. Así mismo agradezco a mi madre quien fue pilar importante para poder lograr culminar con éxito este proceso gracias a su cariño y apoyo incondicional. A mi padre que desde su formación académica contribuyo al gusto por esta área del conocimiento de igual forma por su apoyo y querer siempre. A mi hermano David por que ha sido mi amigo incondicional y sin él nada de esto se haría realidad. Así mismo hago mención del Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica (CETIA), entidad que me permitió hacer parte de este macroproyecto y poner en práctica lo aprendido durante mi formación académica, y al tutor de esta monografía que gracias a su apoyo este proyecto se llevó a cabalidad.

Índice

Dedicatoria.....	i
Índice	ii
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas.....	viii
Índice de Anexos	ix
Glosario	x
Lista de Abreviaturas y Siglas	xi
Resumen	xii
1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	3
2. Justificación.....	4
3. Objetivos.....	6
3.1. Objetivo General.....	6
3.2. Objetivos específicos	6
4. Marco de referencia	7
4.1. Antecedentes	7
4.1.1. Vehículos aéreos no tripulados (VANT).....	9
4.1.2. Clasificación de los VANT	10
4.1.3. Subsistemas y/o elementos de un VANT.....	15
4.2. Marco Legal.....	20
5. Metodología.....	23
5.1. Fase I: Identificación de las características, subsistemas de abordaje y condiciones de operación del VANT	23
5.1.1. Configuración de rotores y elección de frame	23
5.1.1.1. Elección de la configuración de rotores	24
Metodología de vuelo	24
5.1.1.2. Bocetos conceptuales.....	24
5.1.1.2.1. Diseño estructural inicial	24
5.1.1.2.2. Material de impresión del fuselaje.....	26
5.1.2. Selección de dispositivos y conexión de los sistemas a bordo.....	27
5.1.2.1. Módulo de alimentación	27
5.1.2.1.1. Cargador Imax B6 LiPro Balance Charge	28
5.1.2.1.2. Tester de baterías	28
5.1.2.2. Sistema de control de los rotores.....	28
5.1.2.2.1. Distribuidor de voltaje (PDB) y controlador de velocidad (ESC)	29
5.1.2.2.2. Motores	30
5.1.2.2.2.1. Hélices.....	30
5.1.2.3. Sistema de transmisión de video	31
5.1.2.3.1. Antena transmisora	32
5.1.2.3.2. Cámara FPV.....	32
5.1.2.3.3. Monitor FPV	33

5.1.2.4.	Sistema de transmisión-recepción	34
5.1.2.4.1.	Modulo receptor.....	34
5.1.2.4.2.	Módulo de transmisión	35
5.1.2.5.	Sistema de navegación y telemetría.....	35
5.1.2.5.1.	Módulo GPS NEO-M8N	36
5.1.2.5.2.	Giroscopio-Acelerómetro MPU6000.....	37
5.1.2.5.3.	Magnetómetro QMC5883	37
5.1.2.5.4.	Barómetro BMP280	38
5.1.2.6.	Sistema de control de la aeronave	38
5.1.2.6.1.	Placa controladora de vuelo.....	39
5.2.	Fase II: Implementación del método de control y navegación en la configuración del VANT	40
5.2.1.	iNav	40
5.2.1.1.	Instalación del firmware	40
5.2.1.2.	Set up	42
5.2.1.3.	Calibración	42
5.2.1.4.	Mixer	44
5.2.1.5.	Salidas.....	45
5.2.1.6.	Puertos	46
5.2.1.7.	Configuración	47
5.2.1.8.	Personalización avanzada	49
5.2.1.9.	Receptor.....	50
5.2.1.10.	Interruptores y modos.....	52
5.2.1.11.	GPS.....	54
5.2.1.12.	Mision de vuelo programada	55
5.2.1.13.	OSD	57
5.2.1.14.	Sensores	58
5.2.1.15.	Blackbox.....	59
5.2.1.16.	CLI.....	60
5.2.2.	Radio transmisor	61
5.2.3.	BLHeli	64
6.	Pruebas y resultados	66
6.1.	Propuesta definitiva	66
6.2.	Fase III: Validación del desempeño de los sistemas de control y telemetría mediante pruebas de vuelo	68
6.2.1.	Prueba de eficiencia para selección de rotores.....	68
6.2.2.	Pruebas empuje para selección de hélices.....	71
6.2.3.	Pruebas de vuelo.....	74
6.2.3.1.	Prueba de vuelo Manual	75
Fase 1	75
Fase 2	79
6.2.3.2.	Prueba de vuelo programada	81
6.3.	Impacto socio-económico	87
7.	Conclusiones y Recomendaciones	88
7.1.	Recomendaciones	88

7.2. Conclusiones.....	88
8. Referencias	91
9. Anexos.....	98

Índice de Figuras

Figura 1. El UAV Quimbaya.....	10
Figura 2. Ramificación en función de la forma de sustentación de un VANT.....	10
Figura 3. VANT de tipo ala fija.....	11
Figura 4. VANT de ala rotatoria de cuatro rotores.....	11
Figura 5. VANT de tipo ala zagi de único rotor.....	12
Figura 6. Mavic pro 2 de tipo cuadricóptero..	12
Figura 7. Hélices para rotores fabricadas en polímero	16
Figura 8. Motor Brushless KV1000- motor sin escobillas.....	16
Figura 9. Controladora de vuelo Matek F722-SE.....	17
Figura 10. Especificaciones técnicas y controladora de velocidad Skywalker Hobbywing 80 ^a ..	18
Figura 11. Radio transmisor marca RadioMaster TX16S. "RadioMaster RC TX16S V1.0.....	19
Figura 12. Modulo GPS Neo 6m Arduino.....	19
Figura 13. Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto.....	23
Figura 14. Diagrama de configuración de los rotores de un cuadricóptero X.....	24
Figura 15. Estructuras analizadas por parte del equipo de trabajo	24
Figura 16. Patrón de la estructura seleccionada.....	25
Figura 17. Propuesta de diseño del frame.....	25
Figura 18. Viga que soporta los motores y parte inferior del frame	26
Figura 19. Foto del VANT donde se aprecia el frame impreso.....	27
Figura 20. Batería HRB 14.8 V-3000 mAh 60C.....	27
Figura 21. Cargador de baterías LiPo.....	28
Figura 22. Salva LiPo.....	28
Figura 23. Movimientos de un VANT.....	29
Figura 24. Diagrama del sistema de control de los rotores	29
Figura 25. Placa ESC: Mamba F55_128K	30
Figura 26. Motor brushless Emax RS2205 2300kv	30
Figura 27. Hélice T4943.....	31
Figura 28. Diagrama de conexiones del sistema de control	31
Figura 29. Diagrama del sistema de transmisión de video	32
Figura 30. Antena transmisora	32
Figura 31. cámara FPV Foxeer Razer Mini 1200TVL	33
Figura 32. Pantalla LCD FPV	33
Figura 33. Diagrama de conexiones del sistema de video	34
Figura 34. Diagrama del sistema de transmisión-recepción	34
Figura 35. Receptor Flysky FS-iA6B	35
Figura 36. Diagrama de conexiones del sistema transmisión-recepción	35
Figura 37. Diagrama del sistema de navegación y telemetría	36
Figura 38. Modulo GPS NEO-M8N	37
Figura 39. Magnetómetro QMC5883	38

Figura 40. Barómetro BMP280 .	38
Figura 41. Diagrama de conexiones del sistema de navegación y telemetría .	38
Figura 42. Placa Mamba APP F722 MK1	39
Figura 43. Visualización en pantalla FPV.	39
Figura 44. Diagrama de conexiones de los sistemas a la controladora de vuelo.	40
Figura 45. Validación del puerto serie USB de conexión.	41
Figura 46. Instalación del firmware de iNav 4.1.	41
Figura 47. Menú de configuración de iNav	42
Figura 48. Calibración del acelerómetro y barómetro.	43
Figura 49. Valores de la calibración del Compass.	44
Figura 50. Mezcla de los motores en iNav.	44
Figura 51. Salida de los ESC iNav.	45
Figura 52. Configuración de puertos iNav.	46
Figura 53. Configuración de placa de sensores y buses iNav, y módulo GPS.	47
Figura 54. Configuración del voltaje en los sensores, batería y otras características relevantes. .	47
Figura 55. Validación de la lectura de los sensores.	48
Figura 56. Ajustes ante un fallo de la aeronave.	49
Figura 57. Customización avanzada de los rotores para la navegación.	49
Figura 58. Configuración de parámetros de retorno a casa (RTH) y navegación.	50
Figura 59. Ajustes del modo de recepción.	51
Figura 60. Mapa de canales de recepción.	51
Figura 61. Función de armado canal 5 iNav.	53
Figura 62. Ajuste del canal 6 iNav.	53
Figura 63. Función de RTH canal 7 iNav.	54
Figura 64. Función de Caja Negra canal 8 iNav.	54
Figura 65. Posicionamiento global del VANT.	54
Figura 66. Orientación del VANT en el mapa iNav.	55
Figura 67. Ajuste de la misión de vuelo iNav.	56
Figura 68. Configuración de Waypoints y RTH iNav.	56
Figura 69. Misión de vuelo almacenada en la controladora desde iNav.	57
Figura 70. Configuración de la visualización en la pantalla FPV.	57
Figura 71. Visualización del ajuste del OSD en pantalla.	58
Figura 72. Gráficas de los sensores giroscopio y acelerómetro.	58
Figura 73. Gráficas de los sensores magnetómetro y barómetro.	59
Figura 74. Ajuste del apartado de caja negra en iNav.	60
Figura 75. Respaldo de información desde CLI iNav.	61
Figura 76. Pantalla principal RadioMaste TX16s.	61
Figura 77. Ajuste de canales de movimiento del VANT.	62
Figura 78. Configuración de los canales del sistema para los movimientos.	62
Figura 79. Calibración de mandos del radio transmisor.	63
Figura 80. Conexión de modo enlace del receptor	63
Figura 81. Configuración del transmisor RM TX16S	63

Figura 82. Validación de la conexión a BLHlei.....	64
Figura 83. Inversión de sentido de giro ESC.....	65
Figura 84. Piezas finales del frame del VANT impresas en material Onyx.....	66
Figura 85. Diseño Final del VANT impreso en Onyx.....	67
Figura 86. Sensor Lidar y conexión final del VANT Escorpión.....	67
Figura 87. Configuración sensor Lidar Benewake desde iNav.....	68
Figura 88. Gráfica de eficiencia vs porcentaje de velocidad del acelerador.....	70
Figura 89. Gráfica de corriente vs porcentaje de velocidad del acelerador.....	70
Figura 90. Gráfica de empuje vs porcentaje de velocidad del acelerador.....	71
Figura 91. Gráfica de corriente vs porcentaje de velocidad del acelerador.....	73
Figura 92. Gráfica de empuje vs porcentaje de velocidad del acelerador.....	74
Figura 93. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox.....	76
Figura 94. Visualización de las estadísticas de los motores.....	77
Figura 95. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox.....	78
Figura 96. Visualización de las estadísticas de los motores.....	78
Figura 97. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox fase 2.....	80
Figura 98. Visualización de las estadísticas de los motores fase 2.....	80
Figura 99. Datos de vuelo de la última prueba manual fase 2 software Blackbox Explorer iNav.....	81
Figura 100. Gráfica de las posiciones de los sticks para activación de funciones en la aeronave.....	82
Figura 101. Transmisión de video FPV prueba de vuelo mediante puntos de referencia.....	83
Figura 102. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP.....	84
Figura 103. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP.....	84
Figura 104. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP.....	85
Figura 105. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP.....	86
Figura 106. Visualización de las estadísticas de los motores prueba WP.....	86

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación UAV	13
Tabla 2. Especificaciones técnicas (Controlador de Velocidad)	18
Tabla 3. Características de la propuesta de diseño seleccionada.....	25
Tabla 4. Características de materiales para impresión 3D.....	26
Tabla 5. Asignación de canales	52
Tabla 6. Datos motor XING-E Pro 2306 2450 KV	68
Tabla 7. Datos motor Flash Hobby King 2306 2300 KV.....	69
Tabla 8. Datos motor Emax Eco S 2207 2400 Kv	69
Tabla 9. Datos motor RS2205 - 2300 Kv	69
Tabla 10. Prueba de selección de hélices	72

Índice de Anexos

Anexo 1 – Calibración del sensor acelerómetro	98
Anexo 2 – Calibración del sensor barómetro	98
Anexo 3 – Comprobación de sentido de giro y funcionamiento de los motores.....	98
Anexo 4 – Comprobación del enlace entre el radio control y la aeronave.....	98
Anexo 5 – Explicación y validación del funcionamiento de los interruptores y asignación de canales de transmisión.....	98
Anexo 6 – Configuración de los puntos de referencia para una misión de vuelo	98
Anexo 7 – Funcionamiento de la visualización por pantalla.....	98
Anexo 8 – Comprobación del funcionamiento de los sensores a bordo del VANT.....	98
Anexo 9 – Copia de la configuración final del VANT Escorpión.....	98
Anexo 10 – Calibración del radio control	98
Anexo 11 – Enlace receptor-transmisor	99
Anexo 12 – Montaje final del VANT Escorpión.....	99
Anexo 13 – Prueba de empuje de una de las hélices con ayuda del banco de motores Racerstar	99
Anexo 14 – Datos de la prueba Manual de vuelo Fase 1	99
Anexo 15 – Datos de la prueba Manual de vuelo 2 Fase 1	99
Anexo 16 – Datos de la prueba Manual de vuelo Fase 2	99
Anexo 17 – Datos de la prueba programada mediante WP.....	99
Anexo 18 – Video prueba Manual de vuelo Fase 1.....	99
Anexo 19 – Video prueba Manual de vuelo 2 Fase 1.....	99
Anexo 20 – Video de la prueba Manual de vuelo Fase 2.....	99
Anexo 21 – Video de la prueba Manual de vuelo Fase 2.....	99
Anexo 22 – Prueba de la fase de vuelo programada mediante puntos de referencia (WP) 1.....	100
Anexo 23 – Prueba de la fase de vuelo programada mediante puntos de referencia (WP) 2.....	100
Anexo 24 – Prueba de la fase de vuelo programada mediante puntos de referencia (WP) 3.....	100

Glosario

Concepto	Explicación
Firmware	Es un software que maneja físicamente al hardware, actúa como un sistema operativo.
Frame	Estructura principal en un drone y parte física en donde van instalados el resto de los componentes.
Material ONYX	Es un nylon reforzado con microfibras de carbono que permite crear piezas con mejores acabados.
Material PLA	Es un polímero sintético llamado ácido poliláctico que se deriva de materias primas naturales y renovables
Protocolo IBUS	Protocolo serial de la marca Flysky, maneja comunicación bidireccional, puede enviar y recibir datos: un puerto para los datos del servo y un puerto para los sensores.
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal- Asynchronous Receiver-Transmitter

Lista de Abreviaturas y Siglas

Sigla/Abreviatura	Significado
CETIA	Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica
Control PID	Control Proporcional, Integral y Derivativo
ESC	Control Electrónico de Velocidad- Electronic Speed Control
ESUFA	Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea
FAC	Fuerza Aérea Colombiana
FPV	Visión en primera persona - First Person View
GPS	Sistema de Posicionamiento Global-Global Positioning System
IRC	ImmersionRC
MAVLink	Enlace a micro vehículos aéreos - Micro Air Vehicules Link
OSD	Visualización en Pantalla- On Screen Display
PDB	Placa Distribuidora de Poder-Power Distribution Board
RPM	Revoluciones por minuto
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
VTX	Transmisor de video
WP	Punto de Referencia-Waypoint

Resumen

En el presente proyecto se planteó e implementó un sistema electrónico para telemetría, navegación y control de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de tipo cuadricóptero en el Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica (CETIA) de la Fuerza Aérea Colombiana. Este hace parte de un macroproyecto en el que participan instituciones y profesionales de diferentes áreas de la ingeniería, en donde se diseñó y fabricó la aeronave desde cero con el propósito de monitoreo y vigilancia de una base aérea teniendo en cuenta que su inyección de capital fuera reducida y de materiales asequibles, ya que se ha evidenciado en el mercado, que el costo de adquisición de uno de estos es elevado y con funciones limitadas.

Actualmente en la Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea se prestan patrullajes de vigilancia por medio de estudiantes asignados por la escuela o personal que está prestando el servicio militar quienes se relevan tras un tiempo definido para prestar dicha labor. Según lo comentado por el comandante del Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica (CETIA), esta labor requiere de la participación de un gran número de personas llegando a ser demorada y desgastante para el personal. Problemática que la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) expuso a su centro investigativo CETIA para brindar una solución, así mismo exponiendo la salvedad que fuese una alternativa de presupuesto justo y asequible para la Entidad.

Es por esto que la opción más viable para suplir esta necesidad es la implementación y desarrollo de un VANT comúnmente conocido como *drone*, ya que por medio de este se logra abarcar en primer lugar una vasta cobertura de visión, además permite ser controlado por un personal encargado y así mismo establecer una ruta de monitoreo. Es así que se creó una aeronave con un costo reducido en comparación con una comercial semejante en prestaciones en donde se consideró funciones específicas para el tema de seguridad como lo es la transmisión de video en primera persona, la calidad en los materiales de la aeronave y el funcionamiento del mismo.

La aeronave se adaptó a un perfil de misión de vuelo, ("Parametrización del plan de vuelo de drones", 2019), definido previo al despegue de acuerdo a los requerimientos de la entidad. El perfil de misión se centró en el control del vehículo hacia una locación específica por medio del módulo de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los distintos sensores para la navegación, mientras es monitoreada por un sistema electrónico de telemetría mediante el software *iNav*. Durante el recorrido se logró habilitar un modo ALTHOLD en la aeronave (Hoffmann, 2020), lo cual le permite desarrollar una ruta teledirigida de manera estable y conservando la altitud, para finalmente hacer un retorno al punto de inicio, todo esto bajo una configuración de misión de vuelo cargada desde *iNav*.

Luego de la realización de las pruebas de vuelo tanto manuales¹, como programadas por medio de puntos de referencia se obtuvo un resultado exitoso concluyendo que el VANT Escorpión es una aeronave funcional con la capacidad de generar un monitoreo programado a lo largo de un área definida llegando a simplificar el proceso de monitoreo de vigilancia para la Escuela de

¹ Pruebas en donde la aeronave es radio controlada desde un transmisor, bajo los comandos del piloto

Suboficiales de la Fuerza Aérea (ESUFA) optimizando el tiempo empleado y simplificando la cantidad de personal para dicho fin. Asimismo, al ser una aeronave configurada en un software libre y, fabricada y diseñada con dispositivos comerciales será completamente personalizable de acuerdo a la necesidad que se tenga.

Es así que al finalizar todas las fases y haber cumplido los objetivos del proyecto se hizo entrega del mismo, al comandante del CETIA el señor TC. Richard Humberto Cáceres León persona encargada de hacer entrega de la aeronave al comandante de la FAC para pruebas y su posterior implementación.

Palabras claves: Control de vuelo, cuadricóptero, navegación aérea, sistema electrónico, telecomunicaciones aeronáuticas, telemetría, vehículo aéreo no tripulado (VANT).

1. Introducción

Cada vez es más frecuente la utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) en actividades y sectores comerciales diversos de nuestra sociedad como lo son las competiciones de VANT, la vigilancia, la toma de planos aéreos (Bhardwaj, Anshuman & Sam, Lydia & Akanksha, & Martín-Torres, F. J. & Kumar, Rajesh, 2016) y últimamente, el transporte de mercancía ("Últimas tendencias en el uso de drones para transporte", 2021). Así mismo en el ámbito militar, el uso de estas aeronaves supone un gran progreso, ya que ha logrado simplificar la manera de realizar tareas complicadas o de difícil acceso para un personal humano, y en donde actualmente se sigue experimentando y encontrando nuevos usos y adaptaciones para este tipo de aeronaves como lo es el caso de los cuadricópteros (Santana Cruz, 2017).

El presente proyecto surge de la necesidad del planteamiento e implementación de un sistema electrónico para telemetría, navegación y control de un VANT de tipo cuadricóptero para monitoreo y vigilancia del área que abarca la ESUFA, adaptándose al material de fabricación seleccionado en un primer momento, para que posteriormente gracias a la adjudicación de nuevas tecnologías y mejores materiales se llegara a un resultado con mejores prestaciones técnicas, siempre bajo la salvedad que el costo de implementación de esta aeronave fuese menor a las de especificaciones semejantes que se encuentran en el mercado actualmente.

Para poner en contexto este proyecto se debe saber los elementos y sistemas físicos, mecánicos, electrónicos y lógicos que hacen parte de un VANT, entender el funcionamiento de cada uno de ellos y en general cuales son las limitaciones a la hora de fabricar e implementar una aeronave pilotada a distancia, además de comprender la reglamentación relacionada para su uso en Colombia.

Una vez entendidos los conceptos previos necesarios para comprender la naturaleza del proyecto, se logró implementar una aeronave de cuatro rotores con un frame fabricado e impreso inicialmente en material PLA², guiada bajo una controladora de vuelo *Mamba F722 MK1*, unida a una distribuidora de voltaje *Mamba F55_128K* que incluye el control electrónico de velocidad (ESC) en la misma tarjeta. Para que posteriormente y gracias a la adjudicación de nuevas tecnologías y mejores materiales se llegara a una mejora en la aeronave con características como fabricación del frame en material *Onyx*³ y una mejor geolocalización.

La implementación de un cuadricóptero es en realidad una tarea ardua; debido a la integración de elementos y dispositivos mecánicos, electrónicos, telemétricos e informáticos. Pero gracias a las capacitaciones brindadas y los dispositivos suministrados (motores, controladores de velocidad, tarjetas controladoras, sistemas de radio frecuencia a distancia, y en general) fue posible la integración de un sistema electrónico para telemetría, navegación y control al VANT para monitoreo y vigilancia, capaz de seguir una ruta programada mediante puntos de referencia (WP

² Polímero biodegradable que puede producirse a partir del ácido láctico.

³ Nylon reforzado con microfibras de carbono que permite crear piezas con mejores acabados.

por sus siglas en inglés de *Waypoints*) pudiendo modificar parámetros de altura, velocidad y cantidad de WP de acuerdo a la necesidad de la misión de vuelo.

1.1. Planteamiento del problema

La Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea (ESUFA) comprende un área aproximada de 92 kilómetros cuadrados, la cual alberga un gran volumen de personal militar y civil diariamente. Esta escuela a su vez es catalogada como base aérea por lo cual es indispensable prestar servicios de vigilancia y seguridad en todo momento dentro del área de cobertura de la misma. Actualmente este trabajo se desarrolla por medio de personal que está prestando el servicio militar bajo la función de “Operario de Seguridad, Vigilancia y Control de Instalaciones” como se puede ver en (“SERVICIO MILITAR-SOLDADOS DE AVIACIÓN”, s. f.), el cual se releva tras un tiempo definido para prestar el monitoreo de la base de acuerdo con los lineamientos del comandante de la unidad militar (AVISO Y RESPUESTA QUEJA FAC, 2021), lo cual requiere de la participación de un gran número de personas para esta actividad llegando a ser demorada y desgastante para el personal, según lo comentado por el comandante del CETIA.

Es por esto que se hace indispensable crear un sistema de monitoreo y vigilancia que abarque en primer lugar una vasta cobertura de visión, segundo que pueda ser controlado por un personal encargado y tercero que se le pueda establecer una ruta de monitoreo. Además, es necesario que la inversión para esta solución sea reducida, por lo tanto, se llegó a la conclusión que la opción más viable para suplir esta necesidad es la utilización de un VANT, comúnmente conocido como *Drone*, donde el sistema de control y navegación sea configurable mediante software libre y compatible con tecnologías comerciales de aerodelismo, siendo esto último un requisito fundamental ya que no se desea crear una dependencia con un fabricante.

Por lo anterior se le asignó la tarea al CETIA de diseñar y fabricar una aeronave desde cero, con la necesidad de implementar dentro de la aeronave un sistema de telemetría, navegación y control que le permitan cumplir con su propósito de vigilancia y seguridad. El cual se debe integrar con los demás sistemas de la aeronave para lograr un prototipo funcional que permita apoyar la tarea de monitoreo y vigilancia en la ESUFA, es por esto que se requiere que estos sistemas de navegación y control sean compatibles con partes de aerodelismo genéricos y sean programables en software libre. Todos los sistemas de esta aeronave son de diseño exclusivo, por lo que se necesita realizar el planteamiento de diseño y su configuración de tal manera que se adapte a las características particulares de este VANT. A raíz de esto, se genera la pregunta: ¿Cómo implementar un sistema para la telemetría, navegación y control de un VANT tipo cuadricóptero con fines de monitoreo?

2. Justificación

Actualmente en el mercado comercial se puede encontrar un gran espectro de vehículos aéreos no tripulados (Drones-UAVS-RPAS-VANT-UAS) semiprofesionales y profesionales en marcas como: DJI, Potensic, Hubsan, Autel, Xiaomi, 3DR o Parrot ("Comparativa drones 2022: los mejores productos del mercado", 2022). Con precios en la categoría semiprofesional que oscilan entre 600 y 1.000 euros y en la categoría profesional entre 2.000 y 20.000 euros de acuerdo a especificaciones técnicas del mismo, según lo descrito por Hemav (Hemav, 2018). Todos estos VANT cuentan con características de fabricación, especificaciones técnicas y prestaciones específicas de acuerdo al fabricante, los cuales se podrían adaptar a las necesidades de la Fuerza Aérea Colombiana como lo es el caso del dron DJI Wind 2 donado a la base de tres Esquinas, Caquetá ("Dron DJI WIND 2 es operado por su Fuerza Aérea Colombiana", 2021) con el propósito de "fortalecer los sistemas de seguridad y defensa", pero de acuerdo a lo explicado por el comandante del CETIA el sr TC. Richard Cáceres, dichas aeronaves comerciales cuentan varias problemáticas a resolver, una de ellas es la autonomía de estas ya que es reducida, a pesar de que la mayoría de estas suponen un promedio de tiempo máximo de vuelo de 30 minutos ("Comparativa drones 2022: los mejores productos del mercado", 2022) bajo una batería de 4 celdas de 14.8 V fabricadas de polímeros de Litio con un voltaje nominal por celda de 3.7 V, estas solo pueden descargarse a 3.5 V por celda ya que por debajo de este valor le causaría una pérdida de rendimiento y posiblemente un daño irreparable, según (Dynamo Electronics, 2019). Lo que afecta considerablemente el tiempo de vuelo de estas aeronaves en donde se obtiene una autonomía practica de 18-22 minutos según estudios prácticos realizados en el CETIA, así mismo, dicho tiempo de autonomía se debe considerar para que la aeronave genere la misión de vuelo y de igual forma pueda retornar al punto de partida, siendo factores que cada vez afectan más el tiempo real en una misión de vuelo. La problemática radica en que los fabricantes no generan baterías de mayor carga en la mayoría de casos y la única solución es comprar baterías de respaldo una vez se agoten las de a bordo de la aeronave, según lo comentado por el comandante.

La problemática principal radica en la compatibilidad de los sistemas de telemetría, navegación y control con software libres y la reprogramación de las controladoras de vuelo, además de la falta de adaptabilidad que tienen estas aeronaves con partes genéricas, pues los fabricantes hacen sus aeronaves "herméticas"⁴ donde solo se puede asociar a software y hardware de la marca, generando así dependencia de estos fabricantes con costos elevados y muchas veces de difícil adquisición en comparación a dispositivos genéricos de aeronaves que se pueden conseguir fácilmente en el mercado de aeromodelismo, es por esto que el mantenimiento correctivo de una aeronave fabricada por una empresa comercial ante una falla se hace complicado y lo que se busca en la implementación del sistema de telemetría, navegación y control para el VANT del CETIA es la mayor simplicidad a la hora de una acción correctiva y que estos sistemas sean completamente personalizables y adaptables a futuras necesidades de la entidad.

⁴ Aeronaves diseñadas para no ser desarmadas

Por lo especificado anteriormente, le fue asignado al CETIA la tarea de implementar un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para la seguridad y vigilancia en una base aérea como actualmente se implementa en el Comando Aéreo de Combate No. 4 (Melgar) ("Fuerza Aérea recibe drones para la seguridad y atención de desastres", 2016), "lo cual mejora la inmediatez de la información y la veracidad de las misiones", y más teniendo en cuenta que los monitoreos que se tienen en la actualidad a nivel nacional se realizan por rondas del personal de la seguridad de la base militar (AVISO Y RESPUESTA QUEJA FAC, 2021) de acuerdo a los lineamientos del comandante de la misma. Dicha aeronave debe ser diseñada y fabricada desde cero garantizando que el costo de fabricación sea menor a las de especificaciones semejantes que se encuentran en el mercado comercial, además que la autonomía de esta sea mayor y adaptable a una batería Lipo (Dynamo Electronics, 2019) de mayor capacidad de carga (6S)⁵, y que finalmente cumpla con las especificaciones de telemetría, navegación y control bajo componentes de software y hardware genéricos que le permitan cumplir con su propósito de vigilancia y seguridad por medio de un vuelo estable ("AIRK Drones explica para qué sirven los Modos de vuelo", 2017) y una misión de vuelo personalizable de acuerdo a la necesidad de monitoreo previo al despegue.

El macroproyecto que se realizó en el CETIA supone el planteamiento del diseño e implementación de cada uno de los subsistemas del VANT. De esta forma, no es posible simplemente utilizar un sistema de telemetría, navegación y control disponible en el mercado, sino que se debió configurar teniendo en cuenta las características particulares de esta aeronave. Se logró la integración de cada uno de los subsistemas y su operación como una aeronave funcional que cumple con la misión establecida por la Fuerza Aérea Colombiana.

⁵ Batería de 6 celdas a 22,2 V nominal

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Plantear e implementar el sistema electrónico de telemetría, navegación y control de un vehículo aéreo no tripulado de cuatro rotores que permita un vuelo estacionario, trazabilidad de una ruta programada y cumpla la tarea de monitoreo para el Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica (CETIA).

3.2. Objetivos específicos

1. Identificar las características, subsistemas y condiciones de operación del VANT de monitoreo requerido por el CETIA y los componentes de a bordo de la aeronave, para el planteamiento del software y el hardware que más se ajuste.
2. Implementar un método de control y navegación GPS en la aeronave para el cumplimiento de una misión de vuelo programada de manera estable, al igual que el sistema de obtención de video en primera persona, teniendo en consideración los recursos suministrados por la Fuerza Aérea Colombiana.
3. Verificar el correcto funcionamiento y desempeño de los sistemas de control y telemetría implementados en la aeronave, mediante pruebas tanto en tierra como en vuelo.

4. Marco de referencia

4.1. Antecedentes

La tecnología se ha vuelto parte de nuestro día a día, ayudándonos en las tareas más simples y cotidianas trayendo consigo toda una revolución tecnológica conocida como la cuarta ola de la revolución industrial simplificando un sinnúmero de actividades como la de monitoreo y vigilancia trayendo consigo a este sector de la industria tecnologías emergentes de fácil empleo y adquisición, como lo son por ejemplo los vehículos aéreos no tripulados, o VANT por sus siglas (Velázquez, 2019). En Colombia el uso de aeronaves no tripuladas está afianzándose cada vez más en la sociedad y aún más en el sector productivo y militar, por esta razón los órganos gubernamentales por medio de actos administrativos han regulado el uso del espacio aéreo en cuanto a “aeronaves pilotadas remotamente con fines no recreativos” (Jiménez, 2019).

Los vehículos aéreos no tripulados nacen como una propuesta de una aeronave que sea manipulada remotamente o de forma autónoma, que sea capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido, así mismo que se impulse por medio de un motor eléctrico, de gasolina o de reacción, por lo general suelen tener por la naturaleza de su función una cámara implementada (Lugo y Cifuentes, 2021). Para lograr dicha finalidad en una aeronave es necesario que se cuente con ciertos sistemas que le permitan volar de manera segura y precisa, como lo son los sistemas de control de vuelo, navegación, cámara y sistemas de visión, comunicación, baterías y sistemas de alimentación y sensores especializados todo esto según la necesidad de aplicación de la aeronave como bien se explica en (Fernández, 2013), donde se diseña un modelo de navegación y control autónoma para un cuadricóptero ya existente.

Los sistemas de control de drones han evolucionado permitiendo al usuario controlar la aeronave de manera más precisa y conveniente. Un artículo que proporciona una introducción interesante al diseño de sistemas de control de vuelo para drones y parte de sistemas de navegación utilizando tecnología de bajo costo es el de “Diseño de un sistema de control de vuelo para un dron” (Patiño, Osorio y Torres, 2015), donde se describe el proceso de diseño y construcción de un prototipo de dron, y se detallan los componentes utilizados en el sistema de control de vuelo así como los de navegación incluyendo un sensor de aceleración de tres ejes, un giroscopio de tres ejes y un magnetómetro de tres ejes. Siendo estos tres sensores dispositivos de proximidad fundamentales a la hora de garantizar un control autónomo en una aeronave no tripulada.

En 2017 se elaboró un trabajo técnico que describe el diseño y control de un cuadricóptero autónomo para la inspección visual de infraestructuras industriales basado en control de altitud y el control de posición. Para el control de altitud se usó un controlador PID para mantener la posición y orientación utilizando la información proporcionada por un sistema de medición inercial (IMU) y un sensor de altitud, mientras que, para el control de posición, se implementó un algoritmo de control de navegación que basado en los datos suministrados por un GPS y un sensor de ultrasonido para lograr un vuelo autónomo en una ruta específica, según lo descrito en (Lazcano, Padierna, Bustos, Gómez y Mares, 2019).

Además de tener el control de una aeronave se hace necesario el hecho de determinar tridimensional la posición de esta, para ello toda aeronave debe contar con sistemas de navegación. En el caso de aeronaves no tripuladas se evidencia una evolución que va sistemas simples de control manual hasta tecnologías avanzadas de posicionamiento y navegación que permiten a los drones volar de manera autónoma y mapeo en tiempo real de entornos desconocido (Salazar, 2020). En Colombia, ha habido investigaciones y desarrollos relacionados con sistemas de navegación para vehículos aéreos no tripulados, que bien sirven de punto de referencia para abordar y cumplir los objetivos del presente trabajo, como es el caso del sistema de navegación autónoma basado en odometría visual⁶ y fusión de Sensores el cual combina la información de una cámara y una IMU para estimar la posición y la orientación del dron en tiempo real. La cámara es usada para estimar el movimiento del dron en el espacio 3D, mientras que la información del sensor inercial se utilizó para corregir errores y mejorar la precisión de la estimación. Además, el sistema usa un filtro Kalman extendido que combina la información de los diferentes sensores y obtiene una estimación más precisa de la posición y la orientación de la aeronave, dicho sistema se validó en una aeronave comercial (Ariza, Bernal, Londoño y Jaramillo, 2018).

En 2019 se simuló y probó un sistema de navegación autónoma para aeronaves no tripuladas el cual consistió en la captura de imágenes en tiempo real a través de dos cámaras situadas en posiciones diferentes para obtener información tridimensional del entorno. Gracias a las imágenes captadas se logra un procesamiento que crea una nube de puntos 3D representando la escena capturada, es así que a partir de los puntos se calcula la posición y orientación de la aeronave (Mora, Rojas y Rodríguez, 2019). Un proyecto que también recreó el mapa del entorno y determinó la posición de una aeronave en tiempo real fue el del sistema de navegación para drones con sensor láser 2D, el cual mediante un algoritmo de mapeo y localización simultánea (SLAM) logró recrear el mapa del entorno de vuelo, además del uso de un controlador PID para ajustar la velocidad y la dirección de acuerdo a los datos obtenidos por el sensor láser, este algoritmo se evaluó en un drone comercial DJI Matrice 100 (Saltos, 2015).

A la hora de navegar una aeronave se hace esencial el hecho de efectuar las mediciones y recogidas de muestras de datos remotamente como lo pueden ser la ubicación, altitud, la velocidad, orientación, nivel batería y demás variables de sensores que pueda tener inmersa la aeronave. Estas aeronaves generalmente incluyen una frecuencia de enlace de radio que se usa para las comunicaciones con la Estación de Control en Tierra en su mayoría a través de un puerto serial (Mototolea, 2019). El autor menciona que existe cuatro métodos de sistemas de telemetría para aeronaves no tripuladas como son los sistemas radio analógicos, sistemas de telemetría digital, telemetría basada en satélites e integración con sistemas de control. En el año 2020 se implementó un sistema de telemetría para el control remoto de un cuadricóptero el cual constaba de una placa controladora de vuelo, un módulo GPS, un transmisor de radio y sensor ultrasónico para determinar altura. Este controlador recibe las señales del transmisor en tierra y las ejecuta mientras envía datos de telemetría de vuelo por medio del protocolo S-BUS a una computadora donde se ejecuta el software de control y monitoreo (Rosero y Betancourt, 2020). El trabajo previamente mencionado sirve de guía para la implementación del sistema de telemetría para la aeronave requerida por el

⁶ Técnica que consiste en estimar la posición y orientación de un dispositivo

CETIA a pesar de que no contaba con un sistema autónomo que permitiera la ejecución de una ruta programada.

Por lo anteriormente expuesto se puede afirmar que los sistemas de control, navegación y telemetría son fundamentales para un vuelo exitoso y seguro en una aeronave en general. Estos sistemas permiten un control preciso ya sea teledirigido o programado mediante una ruta, una navegación confiable y una monitorización en tiempo real, lo que aumenta la seguridad y la eficiencia en la aplicación que estos vehículos aéreos no tripulados puedan tener según la necesidad, como en el área de ingeniería en cuanto a su uso en el diseño de la cartografía de un terreno, la medicina como medio para entregar medicamentos, entre otros (Velazquez, Seebach y Torrejon, 2019) o simplemente contar con la capacidad de realizar exploraciones, reconocimientos, rescates, control de tráfico y detectar plazas de vehículos (Chávez y Duarte, 2016), siendo cada vez más relevante en la cotidianidad en que vivimos.

4.1.1. Vehículos aéreos no tripulados (VANT)

Los vehículos aéreos no tripulados son sistemas de aviación diseñados para operar en el aire sin piloto, popularmente se les conoce como drones. Pueden ser controlados de forma remota (desde una estación de control en tierra) o preprogramados para realizar el vuelo automático. En algunos casos, pueden estar diseñados para llevar algún tipo de carga (Neto et al., 2021). Su uso actualmente es cada vez más frecuente en nuestra sociedad en actividades y sectores comerciales diversos y en el sector militar, en este último ha permitido cambiar la forma en que las operaciones militares de alta precisión se llevaron. Actualmente dichas aeronaves son adaptadas para transportar consigo desde cámaras de transmisión de video para vigilancia, hasta armamento y otros componentes militares. En los últimos tiempos, los VANT de combate en las fuerzas militares han ayudado a salvar vidas y ayudar en varias misiones de inteligencia.

Dichos vehículos aéreos disponen de sistemas con distintos grados de automatización y autonomía, así como sensores de navegación y localización integrados en la plataforma de radiocontrol. La tecnología asociada a estos vehículos cuenta con sistemas de control operacional y de vuelo, incluyendo estaciones terrestres e infraestructura de comunicaciones por radio frecuencia. En Colombia la Fuerza Aérea Colombiana se pone a la tarea de sacar el mejor provecho a esta tecnología en temas de vigilancia y monitoreo de instalaciones e infraestructuras públicas y privadas ("Fuerza Aérea recibe drones para la seguridad y atención de desastres", 2016).



Figura 1. El UAV Quimbaya. Saumeth (2021).

El mayor obstáculo que enfrenta actualmente la implementación de estos sistemas es el carácter regulatorio, ya que requiere superar técnicamente las restricciones y procedimientos de seguridad exigidos por las agencias reguladoras para el uso de estos. Para obtener un permiso de vuelo de drones de las autoridades, es necesario determinar el tipo de operación y demostrar su seguridad (Sánchez, 2017).

4.1.2. Clasificación de los VANT

En la actualidad existe una gran diversidad de vehículos aéreos no tripulados que cumplen múltiples funciones y tareas, por lo que segmentarlos en clasificación se vuelve complicado y no está establecida como tal una agrupación universal de estos vehículos, en su lugar se cuenta con clasificaciones según los métodos de operabilidad y modos de funcionamiento de estos.

Una posible clasificación por los métodos de operabilidad es:

- Clasificación basada en la forma de sustentación de la aeronave:

La clasificación principal de los tipos de VANT se basa en cómo se mantienen en el aire. Esta característica también cambiará el tipo de calificaciones reales que un piloto debe realizar para sustentar la aeronave en el aire. Actualmente existen dos tipos: aerodinos (aeronaves con más masa que el aire) y en un segundo grupo los aerostatos (aeronaves por suspensión de gas más ligero que el propio aire), véase en (Sánchez, 2017). En la figura 2 se presenta una ramificación de esta clasificación, basado en (Valero, 2022).

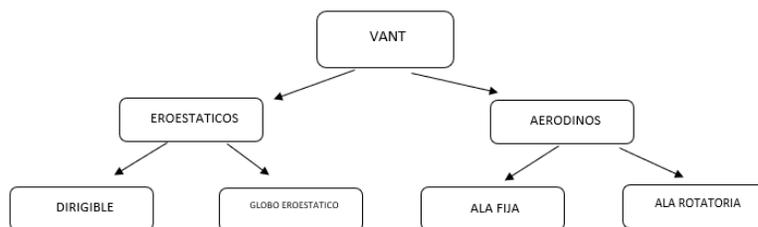


Figura 2. Ramificación en función de la forma de sustentación de un VANT.
Autoría propia.

Actualmente los VANT más comunes y usados para fines civiles y militares son los de tipo aerodinámicos en su clasificación de: aeronaves de ala fija y de ala rotatoria.

- **De tipo ala fija:** Este tipo de aeronaves requieren una velocidad de vuelo inicial para poder mantenerse en el aire. No pueden despegar por sí solos, pues necesitan que alguien o mecanismo de propulsión, ver figura 3. Estéticamente, son lo más parecido a un avión ordinario. Las características aerodinámicas de este tipo de VANT les otorgan una gran autonomía de vuelo y pueden volar durante varias horas, pero el nivel de maniobrabilidad es mucho menor al que poseen por ejemplo las aeronaves de ala rotatoria, lo que les impide ser utilizados en espacios con obstáculos o de poca extensión (Yara Doamo, 2017).



Figura 3. VANT de tipo ala fija. Rodríguez (2020).

- **De tipo ala rotatoria o multirrotores:** Son aeronaves no tripuladas de tipo aerodinámico que consiguen la sustentación gracias a las hélices que llevan incorporadas en los extremos de cada brazo de su estructura (Rodríguez, 2020). Cada hélice está impulsada por un motor y tiene una gran estabilidad durante el vuelo, en la figura 4 se puede observar un VANT multirrotor con la distribución de rotores más comercial actualmente. A diferencia de los VANT de ala fija, los de múltiples rotores pueden permanecer estacionarios mientras se desplazan en el mismo lugar. En los drones de ala rotatoria, podemos organizarlos en subcategorías en función de la cantidad de brazos o motores que tengan, (CIAIAC, 2011).



Figura 4. VANT de ala rotatoria de cuatro rotores. Rodríguez (2020).

La agrupación de los VANT en función de la tipología por número de rotores o brazos que poseen es la más común y fácil de reconocer. Cada brazo del vehículo aéreo suele tener un rotor, aunque en algunos casos pueden implementarse más de uno de estos (Rodríguez, 2020).

- **Aeronaves con un solo rotor:** Este tipo de vehículo aéreo posee un único motor ubicado generalmente en la parte central de la aeronave para generar

la sustentación y una implementación de alerones para compensar el torque del motor, como es el ejemplo del Ala Zagi un tipo de aeronave deportivo propulsada por un único motor que en ocasiones se vuelve más complicado de pilotar (Sánchez, 2017), ver figura 5.



Figura 5. VANT de tipo ala zagi de único rotor. Yara Doamo (2017).

- **Aeronave con tres rotores:** Conocidos comúnmente como tricópteros y constan de tres brazos y tres motores: los dos primeros giran en direcciones opuestas para anularse entre sí, y los últimos funcionan con servomotores para proporcionar estabilidad de vuelo (CIAIAC, 2011).
- **Aeronave con cuatro rotores:** Conocidos comúnmente como catricópteros o quadrotor es una aeronave tipo helicóptero que cuenta con cuatro motores para su sustentación y propulsión. Los cuatro rotores están distribuidos en las extremidades de los brazos que generalmente están en forma de cruz, pero no necesariamente es la única distribución, en esta configuración de rotores es necesario que dos hélices giren en un sentido y las otras dos en el otro sentido a revoluciones determinadas (Visioli & Practical, 2006) esto con el fin de sustentar la aeronave en el aire.



Figura 6. Mavic pro 2 de tipo cuadricóptero. "Mavic 2 - DJI" (2021).

- **Aeronave de más de cuatro rotores:** Son aeronaves de ala rotatoria que como su clasificación lo indican poseen 5 o más rotores y así mismo se les denomina, por ejemplo, las que cuentan con 6 rotores (Hexacópteros), las de ocho rotores (Octocópteros) y así dependiendo de la cantidad de motores que tenga la aeronave (Visioli & Practical, 2006).
- Clasificación por su alcance, peso de despegue (MTOW, Maximum Take-Off Weight) y altitud máxima:

Los VANT a su vez se pueden clasificar según el alcance máximo en kilómetros (o millas) o por la altitud máxima que alcanzan, por lo general, cuanto mayor es la aeronave, estos valores límite son a menudo más grandes. La OTAN, Organización del Tratado del Atlántico Norte agrupa estas características (peso de despegue, radio de operación, altitud y el tiempo de uso), como se puede evidenciar en la tabla 1, basada en (Szabolcsi, 2016).

Tabla 1

Clasificación UAV

<u>Categoría</u>	<u>MTOW (kg)</u>	<u>Rango de operación (km)</u>	<u>Altitud (m)</u>	<u>Tiempo de vuelo (h)</u>
Nano (η)	$\leq 0,025$	<1	100	<1
Micro (μ)	5	<10	250	1
Mini	25	<10	150 - 300	<2
Cobertura 1 (<i>Closerange</i>)	150	10 - 30	3000	2 - 4
Cobertura 2 (<i>Short range</i>)	200	30 - 70	3000	3 - 6
Altitud baja y elevada autonomía (LALE)	<25	> 500	3000	> 24
Altitud media y elevada autonomía (MALE)	1500	> 500	14000	24 - 48
Altitud alta y elevada autonomía (HALE)	4500 - 12000	> 2000	20000	24 - 48
Estratosférico	25 – mas	> 2000	20000 - 30000	> 48

Nota. Esta tabla muestra la clasificación de UAV según la OTAN (Organización del Tratado del Atlántico Norte), modificada de (Szabolcsi, 2016).

- Clasificación por métodos de control, basado en (Garijo Verdejo et al., 2009):
 - **Autonomía:** el dron no requiere de un piloto humano para controlarlo desde tierra. Está guiado por su propio sistema integrado y sensores. Actualmente esto es ilegal para uso civil.
 - **Monitorizado:** En este caso, se requiere una persona idónea. El trabajo de esta persona es proporcionar información y supervisar el vuelo de la aeronave. El VANT guía su propio plan de vuelo, aunque la persona no pueda controlar directamente el

control, además de cancelar la operación o controlar el dron en caso de accidente, también puede decidir qué acción tomar.

- **Supervisado:** El operador vuela el vehículo aéreo, aunque puede realizar algunas tareas de forma autónoma.
- **Control remoto de la aeronave (R / C):** La aeronave es pilotada directamente por el técnico a través de la consola, y la señal de radio frecuencia se envía directamente al controlador del motor sin ningún procesamiento.
- Clasificación según su finalidad de uso:
 - **Drones militares:** Este tipo de vehículos aéreos no tripulados son de uso exclusivo de las fuerzas militares de cada país, en Colombia por ejemplo encontramos el Hermes 450 y el Hermes 900, fabricados por Elbit Systems, de Israel. Más recientemente llegó el Boeing Insitu Scan-Eagle, de EE. UU (PINILLA, 2019). Adquiridos para labores relacionadas con el orden público y la ubicación de objetivos de alto valor, además de la vigilancia de las fronteras y la infraestructura energética y petrolera del país, entre otras.
 - **Drones de uso civil:** Dentro del uso en la sociedad no militar se pueden diferenciar otros muchos usos de estas aeronaves, desde juguetes hasta aquellos utilizados para un uso comercial como la medida de terrenos o exploración de espacios inaccesibles, realización de reportajes fotográficos y vídeo, etc. Dichas aeronaves son pilotadas desde personas aficionadas al tema hasta profesionales en el aérea ("Drones para uso civil: una tecnología de doble filo", 2013), en la clasificación de uso civil se destaca la aplicación en:
 - **Cartografía e inspección:** Estos son utilizados para la inspección de grandes obras civiles como puentes, edificios, carreteras, entre otros. Estos drones son dotados con cámaras de video de alta resolución que supervisan las obras desde ángulos distintos sin poner en riesgo la vida humana y reduciendo los tiempos de desarrollo.
 - **Filmación de imágenes:** Gracias a la versatilidad de estos VANT en cuanto al control y movilidad, es posible la captura de imágenes en sitios en donde el hombre no podría entrar, estos drones han servido para obtener gran calidad de imágenes en eventos deportivos, elaboración de películas, o filmación de eventos musicales, etc.
 - **Vigilancia:** Funciona similar a la filmación de imágenes, pero con la diferencia que no se graba, sino que se transmite una señal de video en tiempo real para así tener un monitoreo de un lugar, las aplicaciones más comunes pueden ser:

- La seguridad pública y atención de emergencias, por ejemplo, la policía y los bomberos la emplean para ver la situación y proceder en luego ante la acción que esté pasando.
 - Servicios de rescate para localizar personas extraviadas y planear estrategias de asistencia
 - De igual forma usados en la vigilancia para preservación del medio ambiente y monitoreo en aeródromos civiles.
- **Aficionados:** Un dron puede proporcionar horas de aprendizaje y diversión en diferentes ámbitos como lo pueden ser la filmación fotográfica de forma aficionada en donde se puede ver una perspectiva del lugar donde se está sobrevolando, o la filmación en primera persona que se conoce como FPV (Visión en primera persona) en donde el piloto tiene la sensación de que está inmerso en el dron, teniendo una transmisión en tiempo real.

Otro ámbito aficionado podría ser la carrera de drones, en donde drones pequeños realizan acrobacias, zigzagueante entre árboles, y superar obstáculos en circuitos de carreras que ellos mismos trazan.

Últimamente las universidades o centros de educativos tienen programas enfocados en el desarrollo de drones ya que abarca varias áreas de ingeniería como la mecánica, la electrónica, el desarrollo de software, comunicaciones y parte de modelamiento aeronáutico.

4.1.3. Subsistemas y/o elementos de un VANT

Existe un conjunto de subsistemas y componentes a bordo de un VANT, que se interconectan entre sí para hacer posible el vuelo de la aeronave. A continuación, se presentarán los componentes principales de los sistemas para el VANT del CETIA:

- **Sistema mecánico:** Engloba todos los elementos estructurales que influyen en el comportamiento aerodinámico de la aeronave, tomado de (¿Cuáles son las partes de un dron?, 2018).
 - **Frame:** También llamado cuerpo de la aeronave es la estructura principal del vehículo aéreo y donde van instalados el resto de los componentes. Las estructuras de frame de VANT más utilizadas son los de ala fija y de ala rotatoria, ver ejemplo de la figura 4 o 5. Diseñados comúnmente en materiales como polímeros, fibra de vidrios o metales como fibra de carbono y aluminio.
 - **Hélices:** Las hélices generan empuje al mover el aire cuando giran. Cuanto más rápido es girada la hélice, más aire puede mover y más empuje genera. Las hélices

vienen en distintos tamaños y pasos medidos en pulgadas. Cuanto mayor es el área superficial, más aire se puede mover y por lo tanto más empuje, basado en ("Drones para uso civil: una tecnología de doble filo", 2013).



Figura 7. Hélices para rotores fabricadas en polímero. ¿Cuáles son las partes de un dron? (2018).

- **Sistema de propulsión y sustentación:** Los VANT utilizan la velocidad del motor y la dirección de la hélice para generar un empuje de propulsión. El sistema de propulsión controla a su vez la fuerza de gravedad contra la aeronave y también controla el aire a través de las hélices. Se pueden implementar distintos tipos de motores dependiendo del tipo y de las características del vehículo aéreo, (¿Cuáles son las partes de un dron?, 2018).
 - **Motor eléctrico:** Los motores que se implementan para la fabricación de un VANT están compuestos por una parte móvil que es el rotor, que es donde se encuentran los imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor. El uso de motores brushless o sin escobillas son los más comunes para implementar en aeronaves. En este tipo de motor la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator por lo tanto no son necesarias ni las escobillas ni el colector, (Automatizados & Bueno, n.d.).



Figura 8. Motor Brushless KV1000- motor sin escobillas. Automatizados & Bueno (n.d.).

- **Fuente de alimentación:** Permite a los dispositivos electrónicos de navegación, control y telemetría de la aeronave alimentarse para su correcto funcionamiento, al igual tiene como objeto energizar los motores para la propulsión del RPAS. En la fabricación de aeronaves no tripuladas las baterías más populares son las de corriente directa de tipo Li-PO pero

comercialmente se encuentran de diferentes tipologías como, basado en ("Baterías de Drones", 2020):

- **Baterías de iones de litio (Ion-Litio):** Estas baterías tienen aproximadamente el doble de capacidad que las demás comerciales, con 3,7 voltios por celda. Su ventaja es que el litio es el metal más ligero que existe, y estas baterías son más ligeras para la misma capacidad.
 - **Baterías de polímero de litio (Li-Po):** Son baterías recargables usadas en aplicaciones que demandan consumo de corriente considerable en poco espacio y peso. Es el tipo de batería más usado actualmente en los RPAS de propulsión eléctrica. Las baterías Li-Po se componen de celdas de 3,7V las cuales al estar totalmente cargadas alcanzan los 4,2V ver en (Dynamo Electronics, 2019).
 - **Baterías de níquel-metal-hidruro (Ni-MH):** Estas utilizan hidruros metálicos para las reacciones químicas, en lugar de cadmio, que ha demostrado ser un alto contaminante. Además, tienen mayor capacidad de carga, menor efecto memoria y aceptan carga rápida.
 - **Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd):** Son las baterías más antiguas. Se componen de varias baterías de 1,2 voltios. No soportan cargas rápidas y sufren efectos memoria.
- **Sistema de control de la aeronave:** Dicho sistema tiene la función de evaluar el comportamiento de la aeronave cuando esta encendida y a su vez es el encargado de gestionar las funciones de control de motores, navegación y telemetría, en este sistema se destaca la función de la controladora de vuelo o tarjeta madre y los controladores de velocidad, véase en (¿Cuáles son las partes de un dron?, 2018).
 - **Controladora de vuelo:** En esencia es el cerebro de un VANT. Básicamente es una placa de circuitos integrados que incluye sensores básicos como giroscopios y acelerómetros (Gyro y Acc). También recibe comandos de usuario y controla los motores para mantener la aeronave en el aire



Figura 9. Controladora de vuelo Matek F722-SE.

- **Firmware:** Además de las diferencias en el hardware, las controladoras de vuelo también usan diferentes tipos de firmware que puede estar especializado para distintas aplicaciones de uso, a continuación, se mencionaran las más populares, adaptado de ("Firmware para un dron", 2019).

- **iNav:** Es un software de código abierto. iNav, como su nombre indica está más orientado a la navegación y el vuelo autónomo, misiones de vuelo siguiendo un mapa de coordenadas concreto y retorno a casa, También se desgajó de Baseflight (software para controladoras de vuelo) y es de código abierto, con buen soporte y actualizaciones regulares.
 - **Betaflight:** Es un firmware gratuito y de código abierto. Se escindió de Cleanflight con un enfoque en el desarrollo de nuevas funciones para el mini-quad. Hoy en día, es el software de control de vuelo más utilizado porque admite una variedad de Fcs, la configuración predeterminada funciona bien y está lleno de funciones para ajustar la configuración de la máquina.
 - **ArduPilot:** Es el software de piloto automático de código abierto más avanzado, completo y confiable disponible. Consta de software de navegación que se ejecuta en el vehículo, junto con el software de control de la estación terrestre.
- **Controlador electrónico de velocidad (ESC):** Es un circuito electrónico que controla y regula la velocidad, aceleración y desaceleración de los motores de los drones, véase figura 10. Muchos ESC también proporcionan la inversión del motor y el frenado dinámico (Rodríguez, nd).

Tabla 2

Especificaciones Técnicas (Controlador de Velocidad)				
Referencia	Dimensiones	Peso (g)	Batería Lipo	Programable
BLHeli-60 ^a -UBEC	73x28x12 mm	63	2-6 LiPo	Si
Skywalker Hobbyng 80A	86x38x12 mm	90	2-6 LiPo	Si

Nota. Tabla de especificaciones técnicas de dos controladores electrónicos de velocidad (ESC).



Figura 10. Especificaciones técnicas y controladora de velocidad Skywalker Hobbywing 80^a. Rodríguez (nd).

- **Sistema de comunicaciones a bordo de la aeronave:** En este sistema es donde se gestiona los enlaces de comunicación entre el piloto de la aeronave, la estación de control en tierra y otras fuentes de información (como el módulo del Sistema de Posicionamiento Global o sus siglas en inglés de GPS).

Entre los elementos de comunicación que comúnmente se encuentran en un vehículo aéreo no tripulado se destacan:

- **Control por radiofrecuencia:** Es un dispositivo que tiene como tarea establecimiento del enlace de comunicación para el control manual de la aeronave desde un transmisor de radio frecuencia, por lo general un control con dos mandos multidireccionales (joysticks) los cuales envían impulsos que dan mandos a la aeronave ("RadioMaster RC TX16S V1.0 Manual del usuario", 2021).



Figura 11. Radio transmisor marca RadioMaster TX16S. "RadioMaster RC TX16S V1.0 Manual del usuario" (2021).

- **Modulo GPS:** El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un tipo de sistema para navegación mediante satélites permitiendo así la localización de la aeronave con una gran precisión que puede llegar a desfases de solo centímetros [14]. En la aeronave también se encarga de recibir las señales de referencia de los satélites geostacionarios y mediante triangulación determinar y comunicar en tiempo real la ubicación de la aeronave al piloto en tierra.



Figura 12. Modulo GPS Neo 6m Arduino. ¿Cuáles son las partes de un dron? (2018).

- **Telemetría:** El módulo de telemetría integrado en el UAV interconecta la estación de control en tierra con el piloto automático para monitorear o controlar el estado de la aeronave. La frecuencia de funcionamiento generalmente utilizada es 435 o

915 MHz. Para evitar interferencias con otros sistemas, se utiliza un protocolo especial llamado MAVLink (Enlace a micro vehículos aéreos) para la transmisión de datos. La cobertura de un módulo de telemetría típico es a nivel de kilómetro (Lorenzo, 2020).

4.2. Marco Legal

Colombia, desde 1944, es país miembro de la Organización de Aviación Civil Internacional – OACI, quienes desde el 2011 están desarrollando un plan de gestión para la operación de los UAS/Drones a nivel mundial véase en (Aeronáutica Civil, 2018). Teniendo en cuenta que el espacio aéreo es de jurisdicción de cada país, el uso irresponsable y excesivo de drones puede llegar afectar gravemente el bienestar social o económico del país, y causar graves afectaciones a la seguridad operacional del transporte aéreo.

Esto significa que cada estado miembro de la OACI es responsable de las consecuencias del abuso del espacio aéreo. Cada país tiene una autoridad de aviación responsable de controlar y garantizar el cumplimiento de los tratados interestatales para salvaguardar los intereses nacionales. En Colombia, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) es la autoridad de aviación civil, quien regula todas las actividades civiles en el espacio aéreo colombiano de igual forma los requisitos de operación y navegabilidad de estos dispositivos, en concordancia con las recomendaciones emitidas por la OACI.

Circular Reglamentaria 002, 2015- Aerocivil.

REQUISITOS GENERALES DE AERONAVEGABILIDAD Y OPERACIONES PARA VANT
(Numeral 4.25.8.2)

Dicha circular emitida por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil tenía como propósito ampliar la información e impartir instrucciones de cumplimiento en referencia a los requisitos de Aeronavegabilidad y Operaciones necesarios para obtener permiso de acuerdo con lo establecido en los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC). Esto en relación con la realización de operaciones de Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), diferentes a las de recreación y deporte (Aeronáutica civil de Colombia, 2015). En concordancia al objetivo del proyecto la circular menciona ciertas condiciones de aeronavegabilidad a tener en cuenta tales como:

- Las hélices de la aeronave no podrán ser metálicas
- La aeronave debe estar equipada con un modo de vuelo que permita efectuar la recuperación de la aeronave, así como tener inmerso un módulo de geolocalización
- Se debe contar con un sistema para la seguridad en vuelo, tal como un *Return to Home* en caso de emergencia
- Se permite el control (vía radio) del aparato en todas sus fases de vuelo y que se provea información sobre las condiciones de operación (Altitud, rumbo, velocidad, altitud de vuelo, distancia al operador, monitoreo de batería, etc.)

- Los sistemas de radio control, de transmisión y recepción de datos o imagen no deberán causar ningún tipo de interferencia a otros tipos de sistemas o actividades aeronáuticas o no aeronáuticas.

Dicha normatividad aplicaba a cualquier persona (natural o jurídica) u organizaciones gubernamentales civiles interesadas en efectuar operaciones en el espacio aéreo colombiano con aeronaves pilotadas a distancia RPA, con fines diferentes a los de recreación y deporte.

Desde el 05 de febrero de 2019, entró en vigor la nueva regulación de Drones en Colombia reemplazando la circular 002 del 2015.

Resolución No. 04201 del 27 de diciembre de 2018

Tiene como objeto ampliar la información e impartir instrucciones de cumplimiento en referencia a los requisitos de aeronavegabilidad y operaciones necesarios para realizar vuelos de VANT en el país. Dicha resolución clasifica la operación con VANT de acuerdo al riesgo operacional que estas puedan tener, segmentándolas en tres clases: A, B y C. De acuerdo a las necesidades del proyecto la aeronave se clasifica en Clase A, ya que se cuenta con un peso máximo al despegue (MTOW) entre 250 gr y 25 Kg, (Aeronáutica Civil, 2018). Así mismo se menciona las condiciones de operación que debe tener un VANT clase A y que todo propietario deberá estar inscrito en la base de datos de la Aerocivil.

La Regulación de vehículos aéreos no tripulados en Colombia tiene la característica de ser norma, ya que ha sido integrado en el Reglamento Aéreo de Colombia (RAC) No. 91, específicamente en el apéndice 13 ("Reglamentación", 2022).

Esta modificación les da facultades a las autoridades del país (ej: Policía Nacional, fuerzas militares) para indagar, confiscar, y controlar el uso de UAS o Drones en espacios no autorizados.

Reglamento Aéreo de Colombia (RAC) No. 91- Apéndice 13.

El documento del RAC 91 (Reglas generales de vuelo y de operación) apéndice 13 acerca de operación de sistemas de aeronaves no tripuladas – UAS (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2021) toma como referencia los documentos de la OACI y parte de sus países aliados. En dicho apéndice se afirma que la regulación de vehículos aéreos no tripulados en Colombia no cubre operaciones del estado, pero si a todas las personas o empresas que quieran operar Drones o VANT en Colombia.

Este documento menciona que las aeronaves Clase A, cuentan con limitaciones de operación a tener en cuenta tales como que la velocidad de operación de la aeronave máximo debe ser de 80 Km/h, la aeronave debe pesar entre 250 gr y 25 Kg, debe operarse con alcance de línea de vista de máximo 500 m durante todas las fases de vuelo, se podrá generar operaciones de vuelo autónomas bajo supervisión y guiadas. Se menciona como condición de vuelo fundamental que el operador de vuelo genere un chequeo de pre vuelo del sistema de enlace y comunicación entre la estación de control en tierra y el VANT, además de cerciorarse de la disponibilidad suficiente de la energía requerida para la ejecución de la operación, (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil,

2021). Además de contar con un sistema que le permita al operador inmediatamente recuperar o aterrizar el VANT ante alguna novedad.

En general el documento abarca los elementos que constituye la integración de los drones al universo de la aviación civil. La regulación de vehículos aéreos no tripulados en Colombia es un paso evolutivo al desarrollo integral de las operaciones en el espacio aéreo.

5. Metodología

Encontrar la solución a los objetivos planteados requirió de un desarrollo organizado y metódico el cual permitió realizar de manera eficiente las diferentes tareas que lleven a cumplir el objetivo general del proyecto. Con este propósito el CETIA implementó al inicio del proyecto para todos los integrantes del equipo de trabajo un plan de acción o ruta de trabajo, el cual agregó al desarrollo del trabajo un orden y unanimidad, permitiendo que el trabajo individual realizado por cada uno de los participantes se integrara de manera coherente en un solo resultado. Este plan de trabajo mencionado anteriormente es la metodología la cual enmarca el desarrollo del proyecto y la cual será descrita claramente a continuación.

Con el propósito de alcanzar el objetivo principal de plantear e implementar el sistema electrónico de telemetría, navegación y control de un vehículo aéreo no tripulado de cuatro rotores que permita un vuelo estacionario, trazabilidad de una ruta programada y cumpla la tarea de monitoreo para el Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica (CETIA), se seccionó el proyecto en tres fases diferentes las cuales permitieran dividir el avance del proyecto y de esta manera distribuir mejor el tiempo disponible hasta la fecha de entrega. Además, dosifican el progreso del proyecto entre el área aeronáutica, electrónica y de telecomunicaciones, permitiendo que en cada una de las etapas del proyecto se junten la mayoría de los esfuerzos en tareas similares

Para el desarrollo del presente proyecto se implementó el diagrama de bloques de la figura 13.

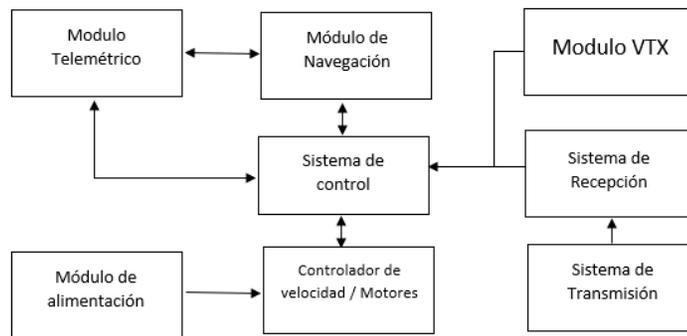


Figura 13. Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto (fuente propia).

5.1. Fase I: Identificación de las características, subsistemas de abordaje y condiciones de operación del VANT

5.1.1. Configuración de rotores y elección de frame

En este apartado se presenta la elección de la configuración de los rotores y el diseño inicial del frame que soportaría los elementos electrónicos y de navegación con base al criterio de los compañeros del área de ingeniería aeronáutica y a la necesidad de ubicación de los distintos sistemas a bordo de la aeronave, dicha aeronave fue denominada como Escorpión.

5.1.1.1. Elección de la configuración de rotores

Luego de analizar los diferentes tipos de multirrotores y sus características generales, en consideración a los requerimientos de diseño para la aeronave de monitoreo, se decide presentar para el VANT Escorpión una configuración de cuatro rotores (cuadricóptero), con una disposición de las vigas de los brazos en forma de H y asegurando en cada extremo un rotor, ver figura 17.

Metodología de vuelo

El cuadricóptero lo componen 4 motores que se ubican en sentidos opuestos uno del otro, para lograr una estabilidad en la aeronave se configura la rotación de las hélices de la siguiente manera:

- Frontal izquierdo – Motor sentido antihorario (CCW).
- Frontal derecho – Motor sentido horario (CW).
- Atrás izquierda – Motor sentido horario (CW).
- Atrás Derecha –Motor sentido antihorario (CCW).

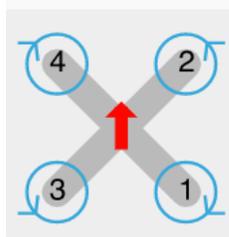


Figura 14. Diagrama de configuración de los rotores de un cuadricóptero X, tomada de iNav.

5.1.1.2. Bocetos conceptuales

5.1.1.2.1. Diseño estructural inicial



Figura 15. Estructuras analizadas por parte del equipo de trabajo. (Fuente propia)

Por unanimidad se decidió escoger un patrón de diseño ondulatorio para los soportes de las vigas que sostendrían los motores, como se puede observar en la figura 16. Con dicho patrón se ahorró material al igual que se ganó resistencia a la flexión.

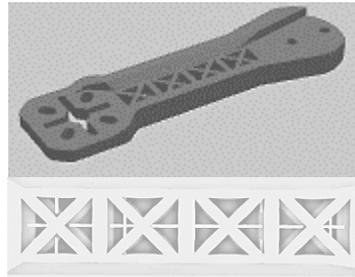


Figura 16. Patrón de la estructura seleccionada (fuente propia).

Se decidió optar por un diseño novedoso compuesto por 4 vigas en configuración H que soportarían los rotores, 2 fuselajes (superior e inferior) ranurados que permite alivianar la aeronave y fácil adaptabilidad a la electrónica, y cuatro soportes como tren de aterrizaje⁷, como se puede observar en la figura 17.

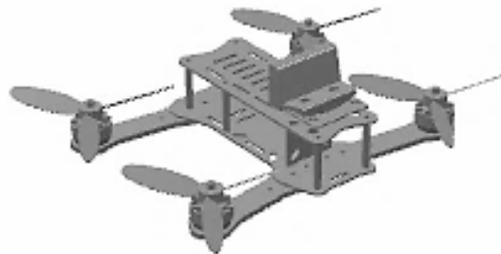


Figura 17. Propuesta de diseño del frame (fuente propia).

En la tabla 3 se puede observar las características del diseño seleccionado inicialmente.

Tabla 3

Características de la propuesta de diseño seleccionada		
Componentes estructurales	Generalidades	Dimensiones
4 vigas	Viga con patrón diagonal	Largo: 155 mm
4 bastones		
4 soportes	Fácil ensamble	Ancho: 220 mm
1 placa separadora		
1 fuselaje inferior		
1 fuselaje superior	Rejilla para electrónica	Alto: 76 mm

⁷ Parte sobre el que se apoya una aeronave para ayudarse en el aterrizaje, amerizaje o despegue.

Nota. Tabla de las generalidades del diseño del VANT Escorpión. (Fuente propia)

5.1.1.2.2. Material de impresión del fuselaje

Tras la investigación de una serie de materiales para hacer impresión 3D, se determinó que el más idóneo para la impresión del fuselaje completo de la aeronave en cuanto a costo-beneficio es polímero PLA, además al ser fabricado de primas naturales y renovables es amigable con el ambiente punto relevante en la decisión. Así mismo, permite una resistencia moderada a los impactos así mismo una cualidad para deformarse sin llegar a romperse. En la tabla 4 se puede observar una comparación de distintos polímeros para impresión.

Tabla 4

Características de materiales para impresión 3D				
	PLA	PET	ABS	TPU
Resistencia	Resistencia media	Precalentamiento	Precalentamiento	Muy flexible
Generalidades	Extensible y elástico	Facilidad de impresión	Resistente al impacto	Resistente al impacto
Característica de impresión	Facilidad de impresión	Resistente y flexible	Buena ductilidad	Resistente a la rotura
Temperatura (°C)	200-240	210-240	220-250	215-250
Costo (COP)	85000	70000	79000	140000

Nota. Tabla de cuatro tipos de polímeros para impresión 3D. (Fuente propia)

Tras la elección del material se imprimieron las piezas enunciadas en la tabla 3, a continuación, se pueden apreciar parte de ellas.



Figura 18. Viga que soporta los motores y parte inferior del frame (fuente propia).



Figura 19. Foto del VANT donde se aprecia el frame impreso (fuente propia).

5.1.2. Selección de dispositivos y conexión de los sistemas a bordo.

En esta sección se abordan los distintos dispositivos y componentes de los distintos sistemas para la implementación de la versión del VANT Escorpión de acuerdo con los requerimientos del CETIA.

Todos los dispositivos, componentes y materiales para la realización de este, fueron suministrados por el CETIA de acuerdo con los materiales con que se contaban. En esta implementación se pretendió que el costo de fabricación fuera menor al de una aeronave comercial de prestaciones semejantes. Todas las configuraciones de los sistemas se detallarán en el apartado de configuraciones.

5.1.2.1. Módulo de alimentación

Este módulo es el encargado de suministrar energía a todos los sistemas de la aeronave, esencial para el sistema de control de los rotores, para el proyecto se usó una batería LiPo de la marca HRB de tipo 4S (14.8 V) a 3000 mAh 60C, esta última unidad indica que la descarga en A/h se descargará completamente al transcurrir 60 horas. A continuación, una imagen de la batería.

Se debe tener en cuenta no sobrecargarla por encima de 4.2V y no descargarla por debajo de 3.7V.



Figura 20. Batería HRB 14.8 V-3000 mAh 60C (fuente propia).

Además de la batería es esencial esencia accesorios como el cargador y un tester de baterías, razón por la cual se usaron los siguientes:

5.1.2.1.1. Cargador Imax B6 LiPro Balance Charge

Es un cargador, descargador y equilibrador de baterías LiPo de 2 a 6 celdas., cuenta con una potencia de 80 W, con un alimentador de corriente de 12V y 6 según especificaciones de la marca. Este cuenta con una pantalla LCD para visualizar el estado de carga/ descarga de las baterías y una vez se llega a la a la función solicita genera una alerta indicando que la elección de la solicitud finalizó. Véase en la figura 21.



Figura 21. Cargador de baterías LiPo (fuente propia).

5.1.2.1.2. Tester de baterías

El tester de baterías o más conocido como salva LiPo es un dispositivo que me permite visualizar la el nivel de carga de la batería LiPo, además permite programar un nivel mínimo de carga de las celdas de la batería que al bajar dicho umbral genera un aviso emitiendo un sonido de alarma. Este dispositivo es esencial para salvaguardar la integridad de las baterías lipo de 2S a 8S, ver figura 22 de la foto del dispositivo.



Figura 22. Salva LiPo (fuente propia).

5.1.2.2. Sistema de control de los rotores.

Este sistema es el encargado de distribuir la corriente de la fuente de alimentación a los 4 rotores y percibir los cambios de la señal de radiofrecuencia emitida desde un radio transmisor para de esta forma generar los distintos movimientos en la aeronave: Alabeo o roll (movimiento de la aeronave hacia la izquierda o la derecha), cabeceo o pitch (inclinación de la aeronave hacia arriba o hacia abajo lo que permite movimientos hacia adelante o atrás) y guiñada o yaw (movimiento de la aeronave en sentido horario o antihorario), ver la siguiente figura.

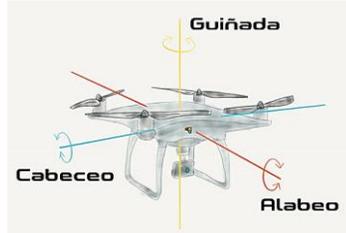


Figura 23. Movimientos de un VANT (Rodríguez, 2020).

Allí una batería de 4 celdas (14.8 V) a 3000 mAh se encarga de alimentar la placa PDB a la entrada de un conector XT60⁸ que está conectado a un capacitor a 35v 470 uF, esta a su vez distribuye la corriente a cada uno de los 4 motores para generar el suficiente empuje a las hélices para hacer despegar la aeronave. Así mismo la Placa Distribuidora de Poder (PDB) es la encargada de alimentar la controladora de vuelo y percibir los cambios de las señales de los motores mediante el protocolo Dshot⁹ y mantener siempre fija la comunicación con la controladora de vuelo.

Este sistema está representado en la figura 24.

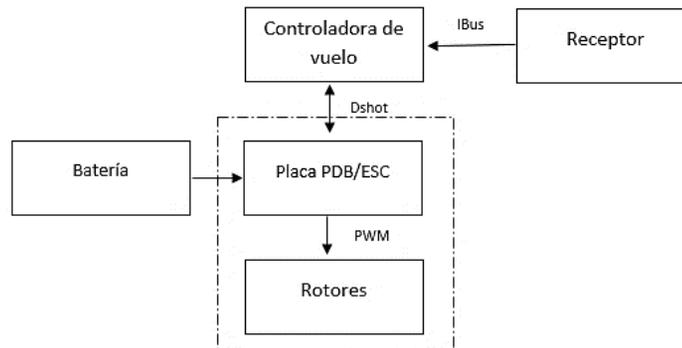


Figura 24. Diagrama del sistema de control de los rotores (autoría propia).

Para el sistema de control de los motores se implementaron los siguientes componentes para el funcionamiento del mismo:

5.1.2.2.1. Distribuidor de voltaje (PDB) y controlador de velocidad (ESC)

Por disponibilidad de la entidad se implementó una placa que viene con cuatro controladores electrónicos de velocidad (ESC) compactos y es de referencia Mamba F55_128K, además lleva consigo una distribuidora de voltaje que permite repartir el voltaje a los cuatro rotores de la aeronave.

- Voltaje de entrada batería LiPo (3S-6S)
- Entrada XT60

⁸ Conector fabricado para soportar altas temperaturas.

⁹ Protocolo capaz de descartar pulsos erróneos, cuenta con una resolución de 2000 pasos

- Peso approx. 15 g
- Dimensiones: 44.5 × 40 × 7 mm
- Protocolo: Dshot 300/600/1200
- Es programable¹⁰



Figura 25. Placa ESC: Mamba F55_128K (fuente propia).

5.1.2.2.2. Motores

Para la sustentación de la aeronave se usaron 4 motores brushless o sin escobillas medidos en la unidad Kv que es la constante de revoluciones del motor, que se traduce como el número de Revoluciones por minuto (RPM) Revolución por minuto que será capaz de ofrecer el motor cuando se le aplique 1 V de tensión. Para la implementación del VANT del CETIA se usaron motores brushless a 2300kv de la marca Emax de referencia RS2205 como se puede ver en la figura 26, por ejemplo, si se alimenta el motor con una batería LiPo 4S (14.8 V) este girará a 34.040 rpm.



Figura 26. Motor brushless Emax RS2205 2300kv (fuente propia).

5.1.2.2.2.1. Hélices

Las hélices o palas como se les conoce comúnmente cumplen un papel importante a la hora de generar sustentación y empuje de la aeronave, tras una serie de estudios prácticos que

¹⁰ Permiten invertir el sentido de giro por medio de software

posteriormente se detallarán, se llegó a la escogencia de 4 hélices (2 CW/ 2CCW) de tipo tripala con las siguientes especificaciones.

- Diámetro: 4.9 pulgadas
- Paso o ángulo de ataque: 4.3 pulgadas
- Cuchillas: 3
- Material: Polímero



Figura 27. Hélice T4943 (fuente propia).

El sistema anterior es posible entenderlo de mejor manera mediante el diagrama de conexiones bosquejado en la figura 28.

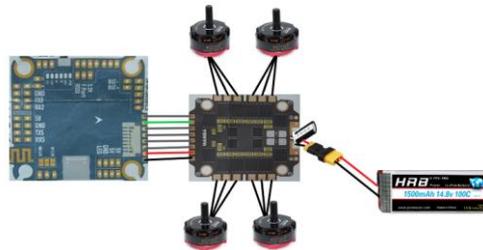


Figura 28. Diagrama de conexiones del sistema de control (autoría propia).

5.1.2.3. Sistema de transmisión de video

Es el sistema encargado de la recepción del video en primera persona (FPV) a la hora de teledirigir la aeronave y transmitirlo a la controladora de vuelo para su procesamiento y retransmisión al dispositivo de visualización FPV mediante una antena transmisora puesta en la aeronave.

Allí una cámara FPV capta la imagen de video y la envía a la controladora de vuelo para agregar la interfaz OSD (Visualización en Pantalla) que permite visualizar por pantalla los parámetros del vuelo o simplemente la configuración de la aeronave que se desea visualizar, para finalmente enviar la señal de video por medio de un Transmisor de Video (VTX) y finalmente recibirla mediante un monitor FPV.

Este sistema está representado en la figura 29.

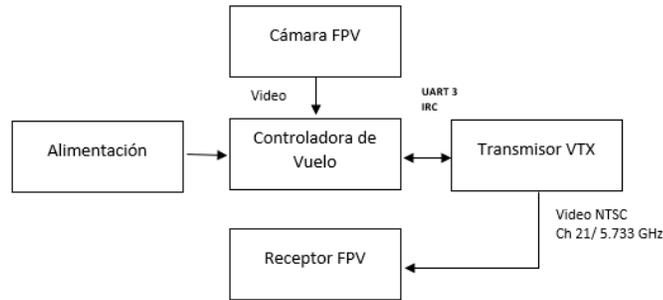


Figura 29. Diagrama del sistema de transmisión de video (autoría propia).

Para el sistema de transmisión de video se implementaron los siguientes componentes para el funcionamiento del mismo:

5.1.2.3.1. Antena transmisora

Para la transmisión de la señal de video se usó una antena genérica que trabaja en la banda de frecuencia superalta (SHF) 5.8 GHz y cuenta con 8 canales, y tiene las siguientes características:

- Frecuencia: (5645-5945) MHz
- Formato de video: NTSC¹¹/PAL¹²
- Conector: SMA
- Voltaje alimentación: 7-14V
- Peso: 25g

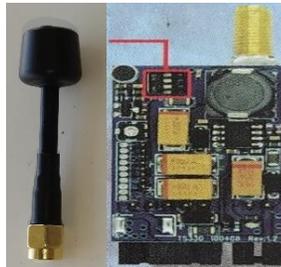


Figura 30. Antena transmisora (fuente propia).

5.1.2.3.2. Cámara FPV

Sera la encargada de la captura del video para posteriormente ser transmitido a un monitor, para el VANT del CETIA se seleccionó una cámara FPV Foxeer Razer Mini 1200TVL, la cual tiene las siguientes características:

- Resolución de 1200 TVL¹³

¹¹ Imagen que compuesta por 525 líneas entrelazadas y se muestra a una velocidad de 29,97 fotogramas por segundo.

¹² Imagen que compuesta por 625 líneas entrelazadas y se muestra a una velocidad de 25 fotogramas por segundo.

¹³ Resolución de imagen medida según las líneas de televisión que puede formar.

- Lente de 2,1 mm
- Relación de aspecto 4: 3, ideal para escenas más amplias
- Sistema de tv: PAL/NTSC



Figura 31. cámara FPV Foxeer Razer Mini 1200TVL (fuente propia).

5.1.2.3.3. Monitor FPV

Un receptor inalámbrico de monitor FPV cumple la función de visualizar la imagen transmitida, se pueden encontrar en forma de gafas que el piloto se coloca para tener visión completa del vuelo de la aeronave o simplemente una pantalla LCD. Para el proyecto se usó como monitor una Pantalla LCD genérica de 4.3 pulgadas con las siguientes especificaciones:

- Resolución: 480x22 píxeles
- Formato de vídeo: NTSC/PAL
- Batería recargable incorporada: 600 mAh
- Rango de frecuencia: (5645-5945) MHz
- 48 canales



Figura 32. Pantalla LCD FPV (fuente propia)

El sistema anterior es posible entenderlo de mejor manera mediante el diagrama de conexiones bosquejado en la figura 33.

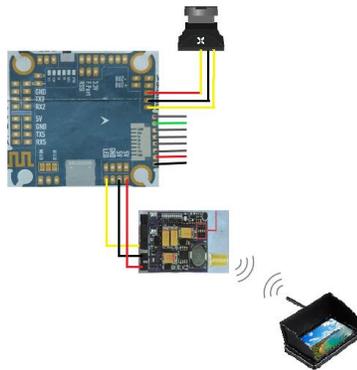


Figura 33. Diagrama de conexiones del sistema de video (autoría propia).

5.1.2.4. Sistema de transmisión-recepción

Este sistema es el encargado de recibir las señales emitidas desde la estación transmisora en donde se generan los comandos para generar las variaciones en la señal PWM del sistema de control de motores y así generar los distintos movimientos de la aeronave. Este sistema está representado en la figura 34.

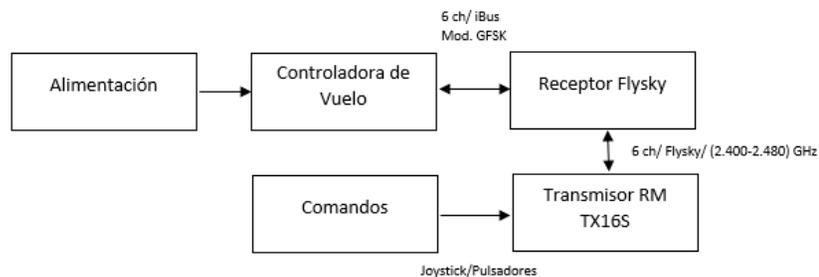


Figura 34. Diagrama del sistema de transmisión-recepción (autoría propia).

Para el sistema de transmisión- recepción se implementaron los siguientes componentes para el funcionamiento del mismo.

5.1.2.4.1. Modulo receptor

Este dispositivo me permite captar las señales de radiofrecuencia del transmisor para procesarlos en la controladora de vuelo, para el proyecto se usó el receptor Flysky FS-iA6B que cuenta con las siguientes especificaciones, (FlySky, 2016):

- 6 canales
- Rango de frecuencia: (2.4055-2.475) GHz
- Potencia de transmisión: = 20dBm
- RF Sensibilidad del Receptor: -105dbm
- Modulación GFSK
- Alimentación 4.0-6.5 V

- Protocolo de comunicación iBus



Figura 35. Receptor Flysky FS-iA6B (fuente propia).

5.1.2.4.2. Módulo de transmisión

Como estación transmisora de radio frecuencia se usó el radio control RadioMaster TX16S, ver la figura 11, es uno de los más completos del mercado y según el manual de usuario se destaca las siguientes especificaciones, ("RadioMaster RC TX16S V1.0 Manual del usuario", 2021):

- Sistema de RF multiprotocolo interno (FrSky, Spektrum o Flysky)
- Compatibilidad: OpenTX
- Frecuencia de transmisión: (2.400-2.480) GHz
- Ganancia de la antena: 2db
- Alimentación: 6.6-8.4 V
- Canales: hasta 16 canales
- Pantalla táctil
- Admite actualización de tarjeta USB-C en línea.

El sistema anterior es posible entenderlo de mejor manera mediante el diagrama de conexiones bosquejado en la figura 36.

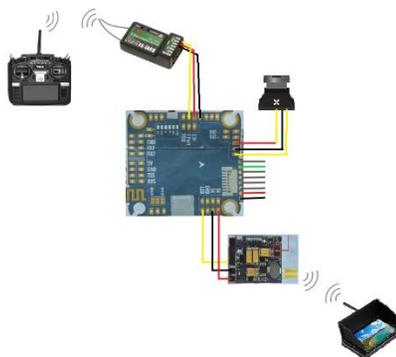


Figura 36. Diagrama de conexiones del sistema transmisión-recepción (autoría propia).

5.1.2.5. Sistema de navegación y telemetría

Este sistema es el encargado de posicionar globalmente a la aeronave para poder ubicarla geográficamente en un lugar, además este sistema se complementa con el de telemetría para

gestionar el estado de la aeronave en vuelo y así garantizar un vuelo estacionario estable y seguro. Este último sistema lo compone sensores como giroscopio, acelerómetro, magnetómetro y barómetro. Gracias a este sistema de navegación y telemetría es que se dio el cumplimiento a uno de los objetivos específicos de implementar un método de navegación GPS en la aeronave para el cumplimiento de una misión de vuelo programada de manera estable, así mismo poder generar trazos de coordenadas para que hiciera una ruta programada y “return to home” o retorno a un punto inicial denotado como casa.

Para el VANT Escorpión se implementó un módulo GPS con compass¹⁴ compatible con todos los sistemas de navegación por satélites lo que permite ser operado en cualquier parte del mundo, este va conectado a la controladora de vuelo por medio interfaz de comunicación UART para el caso del GPS e I2C para el caso de transmisión de los datos de la brújula magnética, así mismo los sensores acelerómetro, magnetómetro y barómetro se reciben mediante el bus I2C de la controladora, este tipo de configuración permite que el dron mantenga una estabilidad horizontal, vertical y rotacional mientras se desplaza. Este sistema está representado en la figura 37.

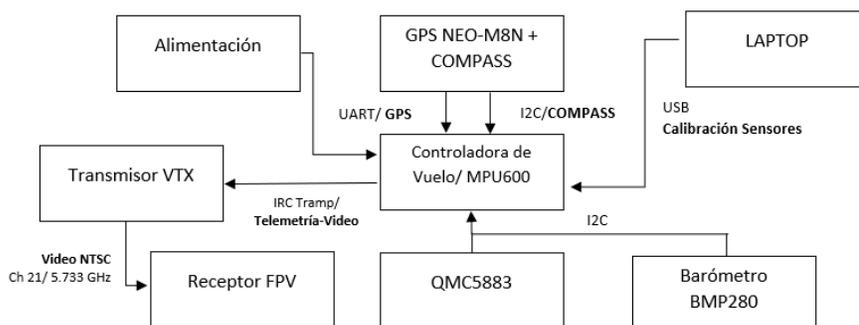


Figura 37. Diagrama del sistema de navegación y telemetría (autoría propia).

Para el sistema de navegación y telemetría se implementaron los siguientes componentes para el funcionamiento del mismo:

5.1.2.5.1. Módulo GPS NEO-M8N

Es un módulo GPS compacto que incluye una brújula digital (COMPASS), emite actualizaciones de posición precisas a 10 Hz y cuenta con una batería de respaldo recargable para arranques en caliente. Está configurado para funcionar a una velocidad de 38.400 baudios, una de las mejoras más relevantes de este módulo es la gran sensibilidad que ofrece pues recibe recepción simultánea de GPS, QZSS¹⁵, GLONASS¹⁶ y BeiDou¹⁷, lo que significa que se debería obtener una señal excelente sin importar en qué parte del mundo se encuentre, basado en ("Módulo GPS NEO-M8N", 2022).

¹⁴ Brújula magnética incorporada al módulo GPS

¹⁵ Sistema de geoposicionamiento japonés

¹⁶ Sistema Global de Navegación por Satélite desarrollado por la Unión Soviética

¹⁷ Sistema de navegación por satélite chino



Figura 38. Modulo GPS NEO-M8N (fuente propia).

5.1.2.5.2. Giroscopio-Acelerómetro MPU6000

Este sensor viene inmerso en la placa de la controladora de vuelo, combina un giroscopio de 3 ejes y un acelerómetro de 3 ejes, es diseñado para precisión en seguimiento de movimiento rápido y lento. Además, trabaja bajo una interfaz I2C.

El giroscopio mide y mantiene la orientación del VANT. Al llevar inmerso 3 acelerómetros, cada uno de los cuales está orientado a lo largo de un eje diferente, se puede determinar el grado de movimiento de una aeronave a lo largo de cualquier eje. Esto permitirá una mejor recopilación de información acerca del balanceo, paso y giro del VANT, para posteriormente retornar la información al controlador proporcional-integral-derivativo (PID) de la aeronave.

Mientras que el sensor acelerómetro se encarga de detectar cuando el movimiento de la aeronave se vea afectado por fuerzas externas, como puede ser una fuerte ráfaga de viento, para luego realizar un ajuste del control PID (Control Proporcional, Integral y Derivativo) para de esa manera ajustar la señal de los motores para compensar el vuelo.

5.1.2.5.3. Magnetómetro QMC5883

Este sensor es el encargado de medir la fuerza y la dirección del campo norte magnético de la Tierra para corregir la trayectoria de la aeronave. El magnetómetro se debe calibrar con frecuencia, debido a que las líneas eléctricas, los motores y cualquier otro campo fuerte emitido por dispositivos eléctricos pueden afectarlo, mediante iNav se puede generar dicha calibración. El chip QMC5883 es un magnetómetro digital de alta sensibilidad que permite medir campos magnéticos, este proporciona datos geomagnéticos de 3 ejes a través de la interfaz I2C. La placa también admite la conexión en cascada I2C, esto quiere decir que permite el uso de varios módulos conectados al bus I2C al mismo tiempo, ideal para la conexión de los demás sensores de la aeronave (Corporation 2016).



Figura 39. Magnetómetro QMC5883 (Corporation 2016).

5.1.2.5.4. Barómetro BMP280

Este sensor permite medir la presión atmosférica, dentro del VANT ayuda a medir la velocidad vertical, mejorar la navegación GPS y determinar la altitud de la aeronave. El sensor de presión barométrica BMP280 es un sensor ambiental con temperatura (ElectroPro n.d.). Este sensor es compatible en I2C (hasta 3.4 MHz) y cuenta con una precisión de temperatura de 1°C.



Figura 40. Barómetro BMP280 (fuente propia).

El sistema anterior es posible entenderlo de mejor manera mediante el diagrama de conexiones bosquejado en la figura 41.

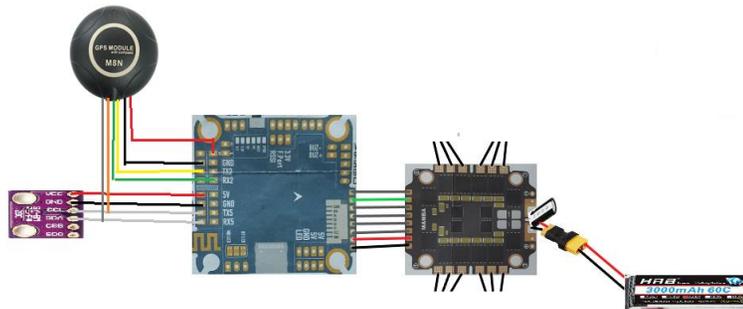


Figura 41. Diagrama de conexiones del sistema de navegación y telemetría (autoría propia).

Este sistema se complementa mediante el sistema de transmisión de video OSD, que luego de la configuración desde iNav de la visualización por pantalla, se puede observar parámetros del estado de la aeronave en vuelo.

5.1.2.6. Sistema de control de la aeronave

Este sistema dentro de la aeronave es el encargado de procesar todos los comandos de funciones y recibir respuesta de los procedimientos de los diferentes sistemas que la compone, esto se logra

gracias a la instalación de un firmware que hace las veces de sistema operativo dentro de la controladora de vuelo que me permite programar tareas y supervisarlas y así garantizar el correcto funcionamiento de la aeronave. Para el caso del VANT Escorpión se usó iNav como firmware y la placa controladora que se mencionara a continuación.

5.1.2.6.1. Placa controladora de vuelo.

La controladora de vuelo dentro de una aeronave no tripulada cumple un papel fundamental ya que es el cerebro de la aeronave de donde se delegan y procesan todas las funciones del VANT. Para la implementación del Escorpión se usó una placa Mamba APP F722 MK1 con características como ("Diatone Mamba Stack - APLICACIÓN (WiFi) F722 MK1 FC", sin fecha)

- Conexión por Micro-USB para programar la tarjeta.
- 6 Uarts¹⁸
- Giroscopio incorporado (SPI), MPU6000
- No cuenta con barómetro.
- Caja negra de 16M Flash Memoria
- Conexión WiFi
- OSD (Visualización en pantalla) que permite visualizar por pantalla toda la información necesaria a la hora de ejecutar un vuelo, con parámetros como batería, altura, horizonte artificial, etc.

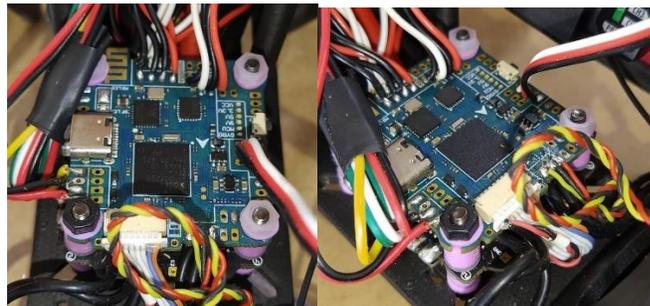


Figura 42. Placa Mamba APP F722 MK1 (fuente propia).



Figura 43. Visualización en pantalla FPV (fuente propia).

¹⁸ Protocolo para intercambiar datos en serie entre dos dispositivos.

El sistema anterior es posible entenderlo de mejor manera mediante el diagrama de conexiones bosquejado en la figura 44.

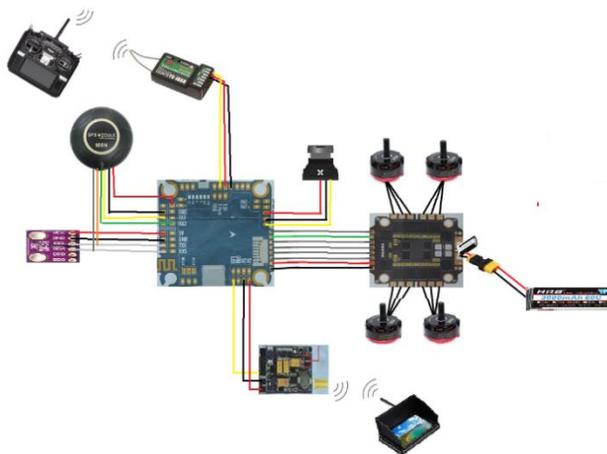


Figura 44. Diagrama de conexiones de los sistemas a la controladora de vuelo (autoría propia).

5.2. Fase II: Implementación del método de control y navegación en la configuración del VANT

Para la configuración de la aeronave será necesario programar la placa controladora e integrarla a los sistemas de la Fase I, configurar el sistema del radio transmisor RadioMaster TX16S e instalar el firmware a la placa ESC, para el caso de la controladora de vuelo se usará el software iNav y para los ESC BLHeli.

5.2.1. iNav

Para la configuración de la aeronave se usó el software llamado iNav en la versión 4.1.0, esta es una plataforma de código abierto por lo tanto su código fuente puede ser descargado sin generar costo así mismo cuenta una Wiki en GitHub en la que se expone una guía de manuales de los módulos y detalles de configuración del software, así como las actualizaciones del mismo (Spychalski, 2022). A partir de dicho repositorio y gracias a las capacitaciones brindadas en el CETIA se logró configurar el VANT con fines de monitoreo de la siguiente manera.

5.2.1.1. Instalación del firmware

La configuración de la controladora de vuelo inicia con la instalación del firmware, para ello se conecta la controladora de vuelo a la laptop y desde la computadora se verifica el puerto serie USB de conexión para luego elegirlo en iNav y seleccionar la velocidad de transmisión, para la configuración se usó una de 115.200 baudios, como se muestra a continuación.

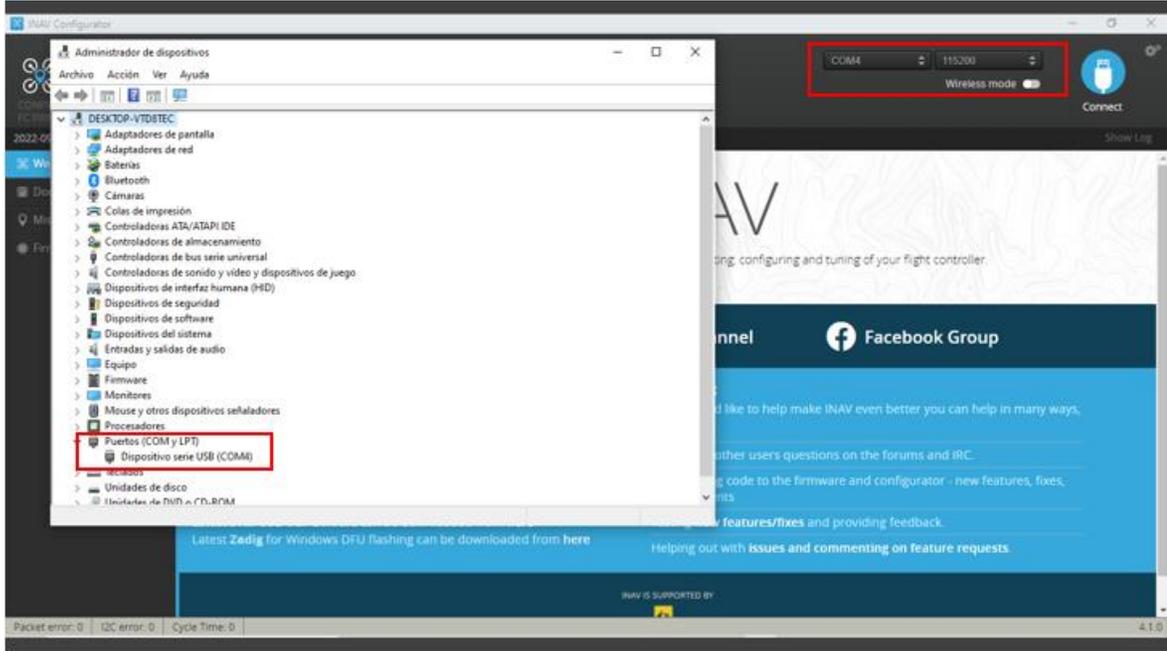


Figura 45. Validación del puerto serie USB de conexión (fuente propia).

En el apartado de “Firmware Flasher” se le instala el firmware de iNav 4.1 a la tarjeta Mamba F722 para así poder desde el software generar toda la configuración de la aeronave y se selecciona la opción de “Load Firmware (local)”, como se muestra en la figura 45.

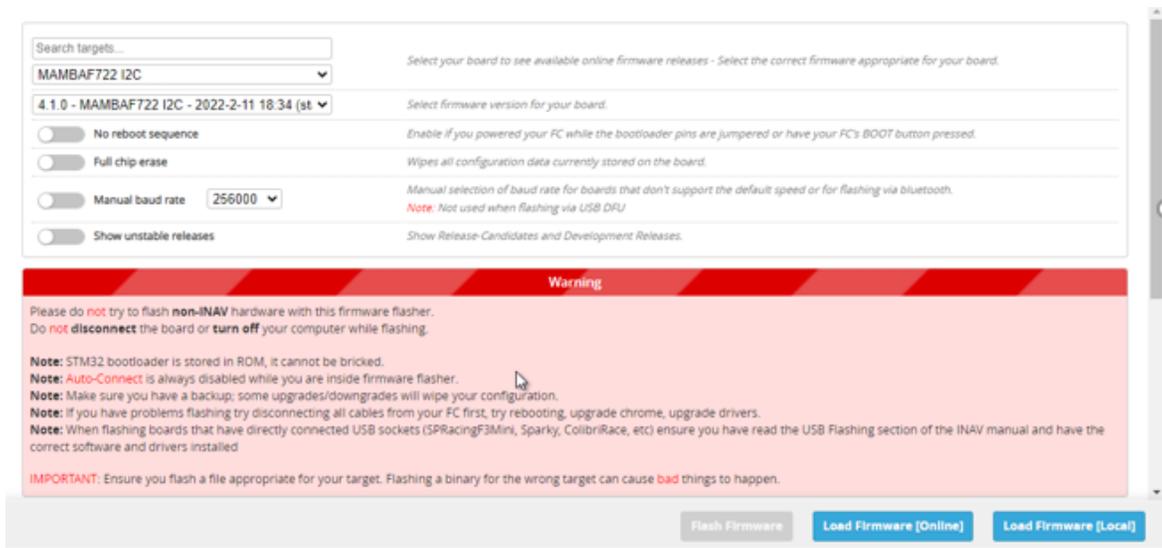


Figura 46. Instalación del firmware de iNav 4.1 (fuente propia).

5.2.1.2. Set up

Al instalarse el firmware se energiza la placa ESC y la controladora de vuelo y se conecta a iNav, obteniendo un apartado de configuraciones a realizarse a la aeronave como se puede observar en la siguiente figura.

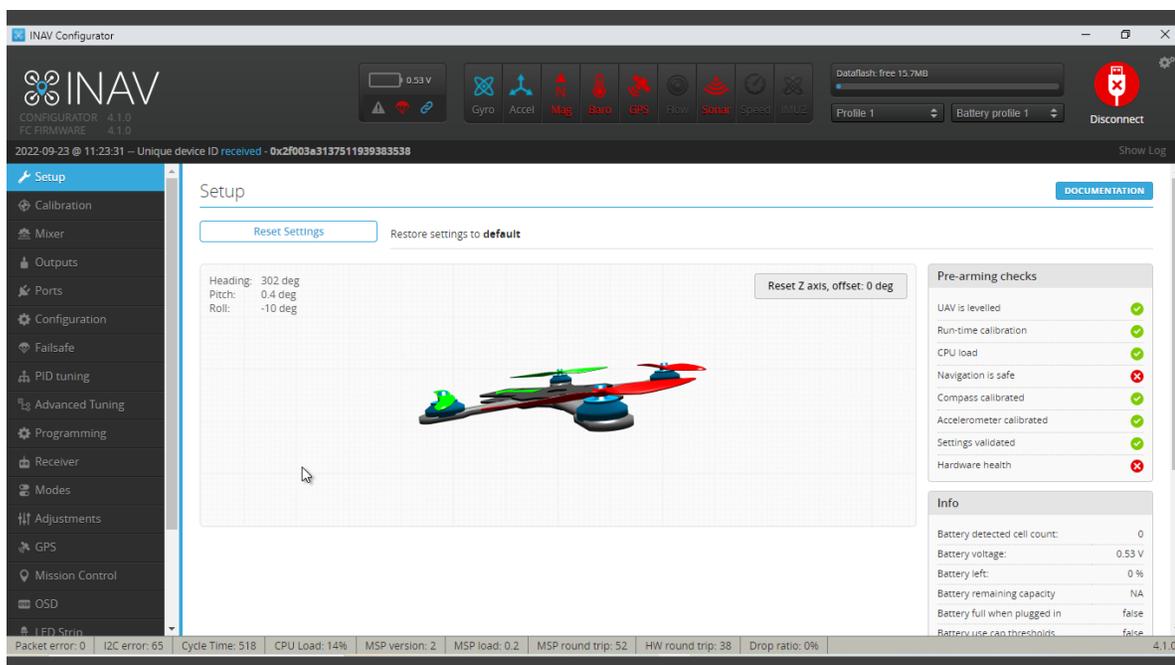


Figura 47. Menú de configuración de iNav (fuente propia).

En la parte superior de la figura 46 se observa los sensores disponibles en la aeronave, en la sección izquierda todos los apartados de las configuraciones, en el centro de la pantalla se observa los grados de inclinación, el alabeo y cabeceo de la aeronave en grados, en la sección derecha la lista de chequeo de los ítems de pre-armado demarcados con color verde para denotar que cumple con el ítem o de color rojo para el caso contrario, de igual manera se observa la información relacionada con el nivel y estado de la batería así como el del sensor de GPS.

5.2.1.3. Calibración

Desde iNav se calibra el acelerómetro y la brújula de la aeronave esto con el fin de determinar cuál es el norte magnético y en qué sentido ejerce la fuerza la gravedad. Para el caso de la calibración y ubicación del sensor barométrico se tuvo que analizar los factores que afectan los campos magnéticos para así ubicarlo en un lugar estratégico dentro de la aeronave sin que le afecte intermitencia por metales, luz, ruido o interferencia magnética de los motores. El acelerómetro una vez se calibra permanecerá en estos valores por un tiempo prolongado a menos que se efectuó un ajuste a la aeronave o esta sufra un choque, en cuanto al barómetro es posible que se tenga que calibrar con más frecuencia ya que este sensor es muy variable por lo que se pudo comprobar en la práctica. A continuación, se observa el proceso de calibración de los sensores en iNav.

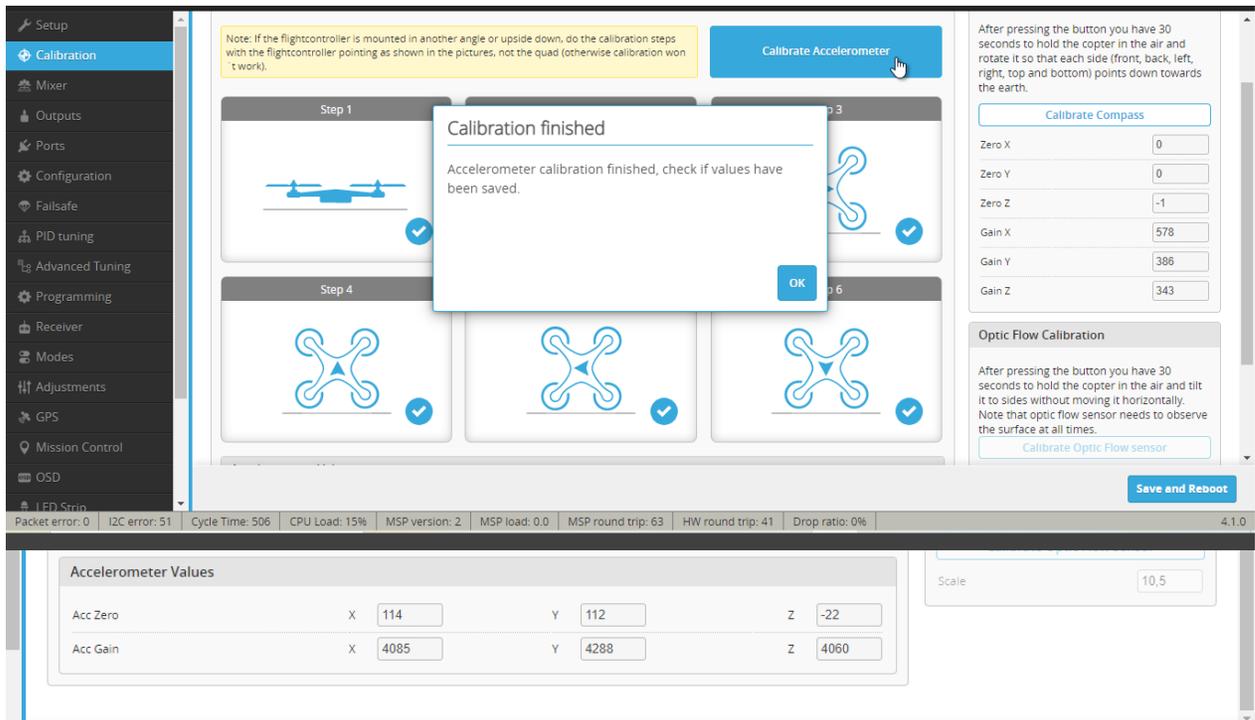


Figura 48. Calibración del acelerómetro y barómetro (fuente propia).

Al seleccionar la opción de calibrar el acelerómetro se habilitan los 6 pasos para calibrarlo, luego se ubica la aeronave en las posiciones que me indica el software y en cada posición se dará click en la opción de “Calibrate Accelerometer” para que así se guarde la calibración en cada paso y genere los valores del acelerómetro, como se puede observar en la figura 47, una vez haya finalizado la calibración se selecciona guardar y reiniciar para que la tarjeta cargue la nueva configuración al sistema, esta es una acción importante para asegurarse que siempre se efectúen los cambios. El video referido de la calibración del acelerómetro de la aeronave se puede observar en el Anexo 1.

Para calibrar el barómetro primero se aísló del ambiente para evitar ser molestado por el aire empujado sobre él por las hélices mediante una espuma, luego en la opción “Calibrate Compass” se abre una ventana de 30 segundos durante el cual se mueve la aeronave de manera específica rotándola 360° en el eje de cabeceo, luego 360° en el eje de balanceo y finalmente 360° en el eje de guiñada, el movimiento se puede ver en la figura 23, en cada paso se generó 2 vueltas y al finalizar la calibración se obtuvo los siguientes valores. El video referido de la calibración del barómetro de la aeronave se puede observar en el Anexo 2.

Compass Calibration

After pressing the button you have 30 seconds to hold the copter in the air and rotate it so that each side (front, back, left, right, top and bottom) points down towards the earth.

[Calibrate Compass](#)

Zero X

Zero Y

Zero Z

Gain X

Gain Y

Gain Z

Figura 49. Valores de la calibración del Compass (fuente propia).

5.2.1.4. Mixer

En este apartado se definen las reglas de mezcla de motores de manera gráfica, aunque se puede configurar por medio de una interfaz de línea de comandos (CLI) mediante el comando *mmix*. Se selecciona el tipo de plataforma que es un multirrotor, luego el mezclador preestablecido que es una configuración en X y se presiona “Load and apply”, cargando así la nueva configuración.

Mixer [DOCUMENTATION](#)

Platform configuration

Platform type

- Multirotor
- Airplane
- Tricopter
- Rover
- Boat
- Other

Mixer preset

Quad X

[Mixer wizard](#)
[Load and apply](#)
[Load mixer](#)

Output Mapping

Output	S1	S2	S3	S4
Function	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4

Motor Mixer

Motor	Throttle [T]	Roll [A]	Pitch [E]	Yaw [R]	
1	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-1"/>	Delete
2	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-1"/>	<input type="text" value="-1"/>	<input type="text" value="1"/>	Delete
3	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	Delete
4	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-1"/>	<input type="text" value="-1"/>	Delete

[Add new mixer rule](#)

Servo mixer

Servo	Input	Weight (%)	Speed (10µs/s)	Active
Logic conditions				

[Add new mixer rule](#)

Figura 50. Mezcla de los motores en iNav (fuente propia).

Así mismo se necesita una regla de mezcla de motores para cada rotor para definir la velocidad en relación con el acelerador solicitado y la dinámica de vuelo: tasa de alabeo, cabeceo y guiñada, así como el acelerador (throttle).

- Alabeo (roll): Indica cuánta relevancia imparte este motor a la velocidad de balanceo de la aeronave, con un rango (-1, 1).
- Cabeceo (pitch): Indica cuánta relevancia imparte este motor a la velocidad de cabeceo de la aeronave, con un rango (-1, 1).
- Guiñada (yaw): Indica cuánta relevancia imparte este motor a la velocidad de guiñada de la aeronave, con un rango (-1, 1).
- Acelerador (throttle): Define la velocidad del motor relativa al acelerador, con un rango (-1, 0).

En la figura 50 se puede observar la mezcla de los motores del VANT, en donde un valor positivo significa que el motor necesita acelerar para una solicitud de tasa de alabeo, cabeceo y guiñada positiva. Un valor negativo significa que el motor necesita desacelerar.

5.2.1.5. Salidas

En este apartado se configura las salidas ESC como se aprecia en la figura 51.

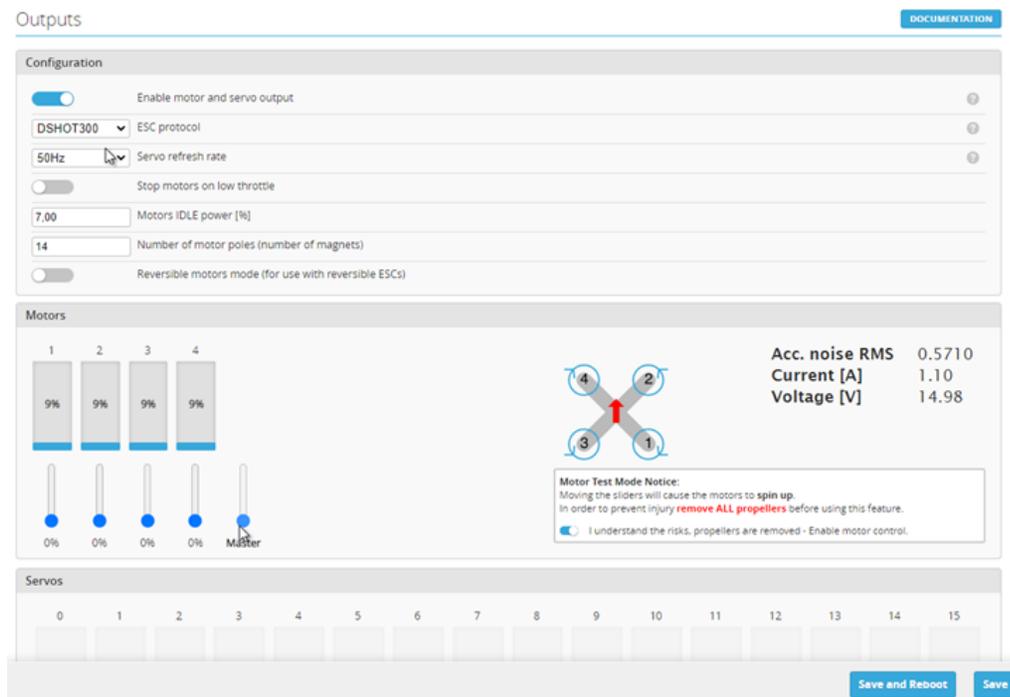


Figura 51. Salida de los ESC iNav (fuente propia).

Se habilita la salida de los ESC, se selecciona el protocolo de comunicación ESC Dshot 300 con el cual trabaja la placa ESC y que se comunica con la controladora, se define que en 7.00% del

porcentaje de aceleración se activará el motor y el número de polos del motor es de 14 ya que es un motor brushless con dicha cantidad de imanes dentro del motor.

Luego se activa el modo de prueba de los motores con el fin de verificar el sentido de giro correcto de los rotores ver figura 14, de igual forma corroborar que cada uno de estos gire al mismo ritmo y tengan respuesta a los cambios de aceleración y observar el consumo de voltaje y corriente de cada uno respecto a porcentaje de aceleración. El video referido a la comprobación de sentido de giro y funcionamiento de los motores se encuentra en el Anexo 3.

5.2.1.6. Puertos

En este apartado se le relaciona a INAV qué tipo de periférico se está usando y dónde está conectado en la controladora de vuelo

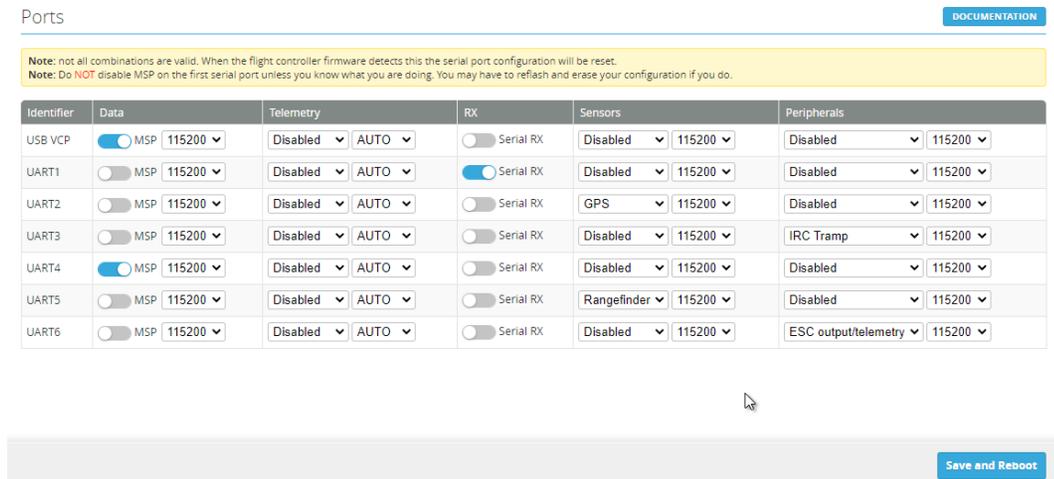


Figura 52. Configuración de puertos iNav (fuente propia).

Se observa en la figura 52, los 6 puertos bajo el protocolo UART de la controladora de vuelo, todos trabajando a una velocidad de 115.200 baudios y configurado así:

- Se activa el puerto COM virtual USB.
- UART 1 puerto asignado al receptor, se habilita el puerto serial de recepción.
- UART 2 puerto asignado al GPS, se habilita el sensor de GPS.
- UART 3 puerto asignado a la transmisión de video, se selecciona el protocolo IRC (ImmersionRC) Tramp.
- UART 4 puerto asignado al WiFi, se activa el puerto.
- UART 5 puerto asignado a telémetros¹⁹.
- UART 6 puerto asignado a telemetría, se selecciona la salida a ESC/telemetría.

¹⁹ Dispositivo que se utiliza para medir la altitud sobre el suelo

5.2.1.7. Configuración

En este punto ya están asignados los puertos de los sistemas que componen la aeronave, y se debe efectuar la configuración de cada uno de estos dispositivos lo cual es pieza fundamental para el correcto funcionamiento de la aeronave a continuación se muestra la configuración de los sistemas.

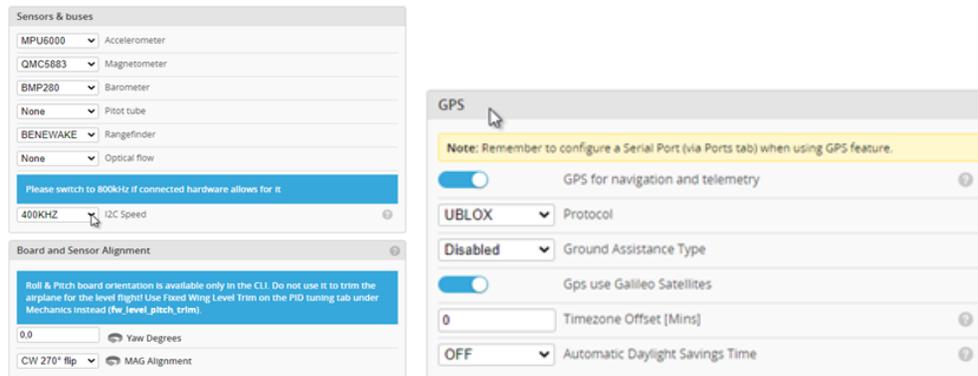


Figura 53. Configuración de placa de sensores y buses iNav, y módulo GPS (fuente propia).

En la figura 53 se observa la selección de los distintos sensores previamente mencionados en el documento y se ajusta a 400 KHZ la velocidad de transmisión del protocolo I2C. El software automáticamente alinea el magnetómetro 5883 a CW 270 flip, quiere decir que efectúa un giro de 270° en sentido horario esto es un sentido estándar cuando se ubica el magnetómetro en dirección hacia adelante como es el caso del VANT Escorpión y esto se puede corroborar en el apartado de “Set Up” efectuando un movimiento de la aeronave y validándolo en la pantalla.

Así mismo en iNav se habilita GPS para navegación y telemetría ya que el GPS NEO-M8N cuenta con compass incluido así mismo este módulo fue desarrollado bajo el protocolo Ublox/NMEA y se habilita el uso de la constelación de satélites Galileo.

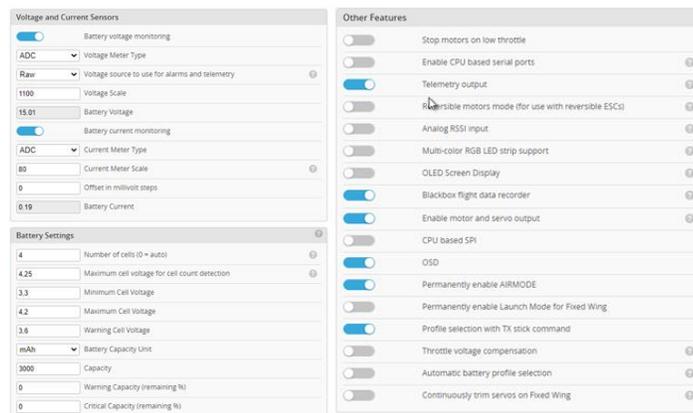


Figura 54. Configuración del voltaje en los sensores, batería y otras características relevantes (fuente propia).

Como se muestra en la figura 54, se habilitó el monitoreo del voltaje y la corriente de la batería mediante un sensor ADC, de igual forma se indica que el voltaje repartido a los sensores telemétricos se distribuirá directamente desde la batería mediante la opción Raw.

Por otro lado, iNav me permite parametrizar los valores de la batería denotando que el sistema va trabajar con una batería de 4 celdas a 3000 mAh, y se definen los límites de nivel de voltaje para salvaguardar la integridad de la batería LiPo y generando así alarmas en la OSD cuando el nivel sea inferior a 3.6 V por celda.

De igual forma desde iNav se habilitan las siguientes funciones:

- Salida de telemetría
- El registrador de datos de caja negra
- Salida de los motores
- Visualización por pantalla OSD
- Selección de funciones desde los sticks del transmisor (evita la conexión de la controladora a la laptop)

Luego de guardar la configuración anterior iNav reconoció los dispositivos telemétricos y el nivel de carga de la batería, y me indica en el chequeo del pre armado que la aeronave aún no está lista para volar puesto que no existe “Navegación Segura”, como se puede observar en la figura 55.

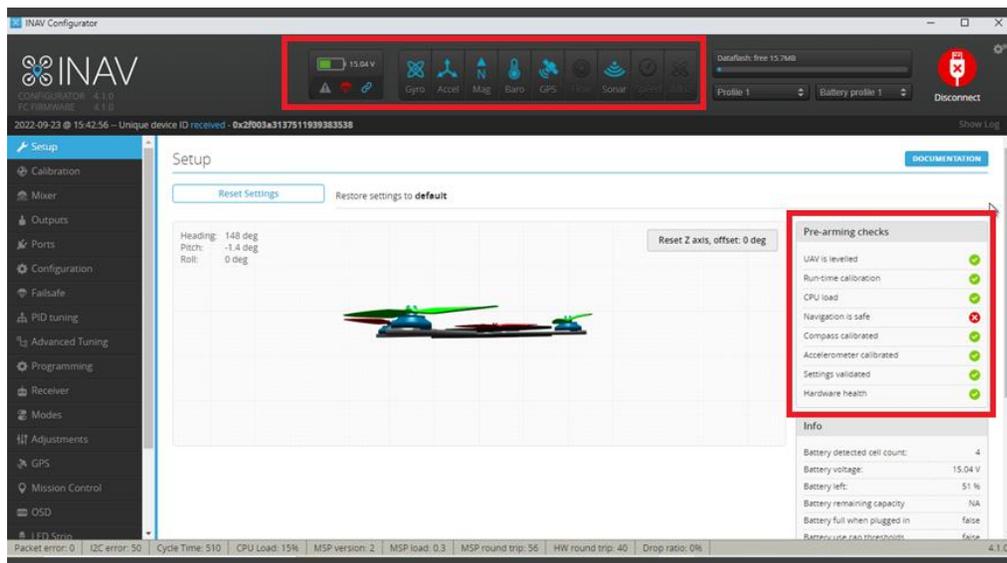


Figura 55. Validación de la lectura de los sensores (fuente propia).

En la sección de “Failsafe” se definió que la aeronave después de 0.5 segundos después de perder señal de transmisión se ponga en modo alerta y que después de 20 segundos de haber perdido señal apague los rotores, si no se recupera señal se indicó que efectuara un retorno a casa. Además, ante un fallo en vuelo a menos de 2 m de distancia del punto definido como casa, la aeronave retornara al punto de origen, véase la configuración en la figura 56.

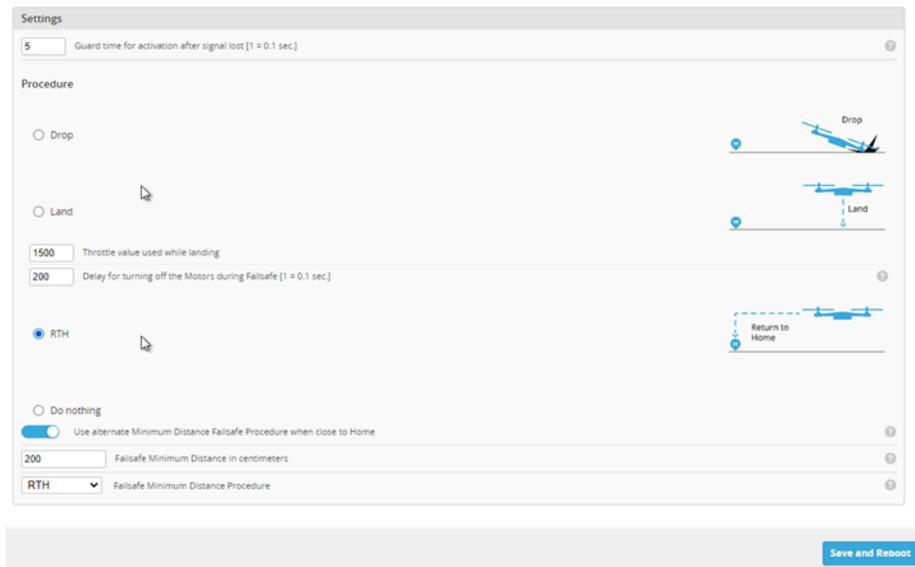


Figura 56. Ajustes ante un fallo de la aeronave (fuente propia).

5.2.1.8. Personalización avanzada

El software iNav permite modificar ciertos parámetros para que el VANT sea autónomo y pueda ejecutar una misión de vuelo programada, lo cual hace parte de uno de los objetivos del proyecto, a continuación, se muestra dicha configuración.

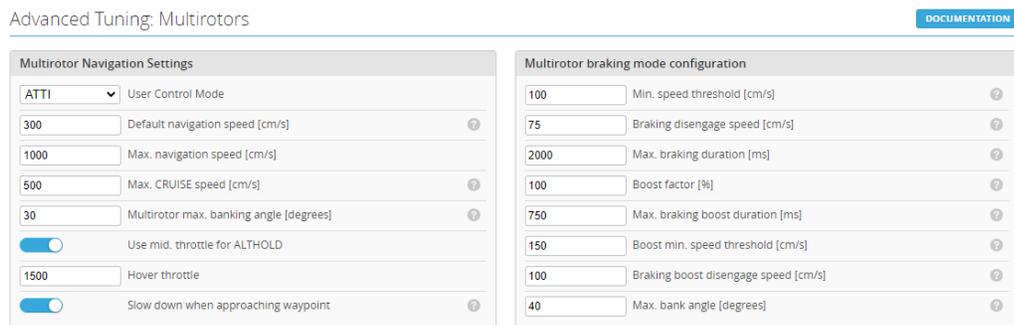


Figura 57. Customización avanzada de los rotores para la navegación (fuente propia).

Se activo el modo de control ATTI que permite que, si algo sale mal con la lectura de la brújula o del gps, desde el radio transmisor se pueda tener un control manual de la aeronave; así mismo se definió la velocidad de navegación que será de 10.8 Km/h. Al habilitar la opción de “Hover throttle” se le indica a la aeronave que en modo de navegación el stick del acelerador estará en el valor de 1.500 que corresponde a la mitad de recorrido y se habilita que reduzca la velocidad al acercarse al punto de referencia (waypoint), para el caso de la ruta programada que más adelante se detallará.

Se definió de igual forma los parámetros del modo de frenado de los rotores como se puede apreciar en la figura 57, esto con el fin de parametrizar la sensibilidad del frenado al momento de un vuelo autónomo o programado definiendo que la aeronave tendrá mantendrá un impulso del 100% de sus motores y desacelerará a una velocidad de 3.6 Km/h; además se configuro que el ángulo máximo de inclinación de la aeronave durante el frenado será de 40°.

De igual forma se ajustó los parámetros del modo retorno a casa (RTH) para que la aeronave regrese a la altitud de 30 m si esta es superada y que siempre aterrice después de RTH, mínimo a una distancia de 2 m, ver figura 58.

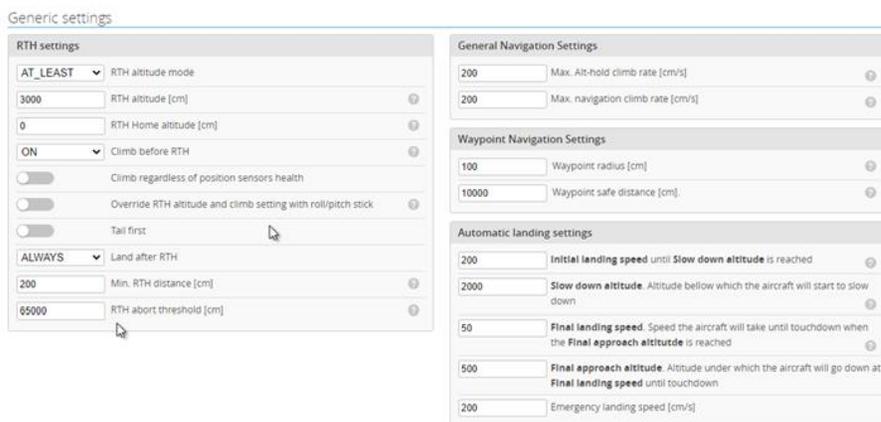


Figura 58. Configuración de parámetros de retorno a casa (RTH) y navegación (fuente propia).

En la figura anterior se puede observar que la aeronave en un vuelo de navegación programada se ajustó para que ascienda a 7.2 Km/h, valor de velocidad semejante cuando se entra en el modo de vuelo ALTHOLD (retención de altitud). Se definió también que los puntos de referencia (waypoint) del modo autónomo tendrán un radio de 1 m a la redonda y que la distancia segura del primer waypoint será de 100 m. Finalmente se ajustan parámetros automáticos de descenso de la aeronave en cuanto a altitud y velocidad, como se aprecian en la figura 58.

5.2.1.9. Receptor

Una vez se enlace (bind) el receptor Flysky FS-IA6B al transmisor RM TX 16S a nivel de hardware, desde el apartado “Receiver” de iNav se ajusta la conexión al receptor indicando que se va trabajar con un receptor de tipo serial bajo el protocolo digital IBUS ya que puede proporcionar una frecuencia de actualización de hasta 120 Hz, más del doble en comparación con los 50 Hz estándar de PPM. El receptor tiene una conexión half dúplex²⁰ que se habilita automáticamente dependiendo si está transmitiendo o recepcionando.

En la parte derecha de la figura 59, se aprecia en el recuadro rojo los valores de respuesta del VANT a posiciones medias el acelerador así que cuanto más plana sea la curva, más suave es la respuesta. Mientras que en el recuadro verde se ajusta la sensibilidad del mando en las posiciones centrales

²⁰ Conexión en la que los datos fluyen en una u otra dirección, pero no las dos al mismo tiempo

de éste, mediante un valor porcentual entre 0% y 100% que dependerá del propósito de la aeronave para el caso del VANT Escorpión será destinado para monitoreo necesita buena sensibilidad.

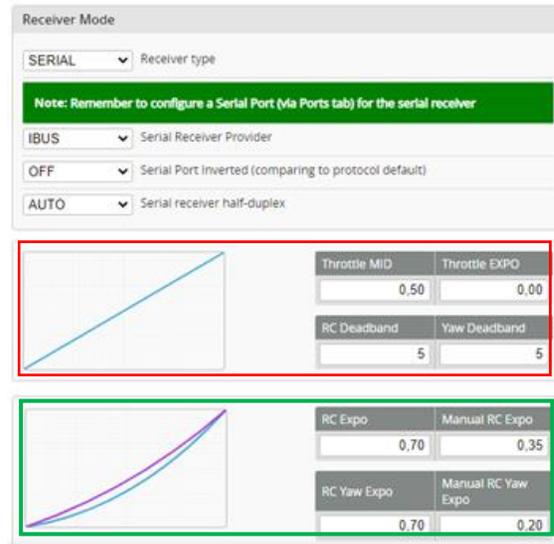


Figura 59. Ajustes del modo de recepción (fuente propia).

Luego se seleccionó el orden de los canales según la configuración del transmisor en este caso está dada por AETR (alabeo, cabeceo, acelerador, guiñada) y se pudo corroborar en este apartado de iNav que al mover los sticks del transmisor se mueve la barra correcta de cada movimiento, véase los movimientos AETR en la figura 60. De igual forma se pueden verificar que los canales del receptor estén funcionando correctamente como se aprecia en la figura 60.

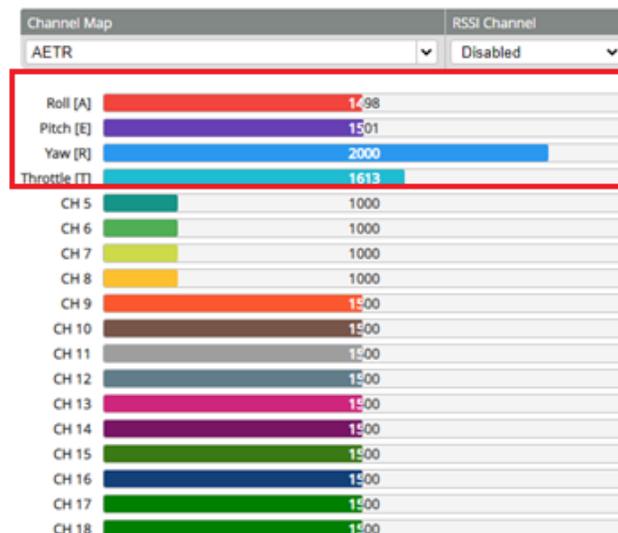


Figura 60. Mapa de canales de recepción (fuente propia).

Ahora bien, se ajusta los recorridos de los canales del receptor dejando el mínimo en 1.000, la palanca centrada en 1.500 y el máximo valor en 2.000, como puedes ver en la figura 59. Cabe aclarar que si estos canales no están bien centrados no se podrán armar los motores para activar la controladora de vuelo. El video referido a la comprobación de conexión del radio control y la aeronave se encuentra en el Anexo 4.

5.2.1.10. Interruptores y modos

Luego de que se tiene control de la aeronave mediante el radio enlace de iNav y el transmisor, se asignan 4 interruptores extra de la Radio para controlar los diferentes modos de vuelo y opciones. Cabe aclarar que en la radio ya están asignados los canales del 1 al 4 para gobernar el cuadricóptero en vuelo. Ahora se asignarán los interruptores del canal 5 al canal 8 como se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5

Asignación de canales

<u>Canal</u>	<u>Tipo</u>	<u>Función</u>	<u>Posición de interruptor</u>		
			1	2	3
5	Armado de motores	Arm			ON
6	Modos de vuelo	Angle	ON	ON	ON
	Modo de navegación	Nav poshold Nav WP		ON	ON
	Modificadores de modo de vuelo	Nav Althold Heading Hold	ON	ON	
7	Modo de navegación	Nav RTH			ON
8	Otros	Blackbox			ON

Nota. Esta tabla muestra la asignación de los modos de vuelo en cada canal (autoría propia).

Desde iNav en el apartado de “Modes”, se configuraron los canales a recepcionar y las funciones de vuelo en cada uno de estos. En la primera opción se selecciona “Arm” que me permite armar motores de la aeronave y se le asigna su comunicación en el canal 5, luego se añade el rango de acción del interruptor de 3 posiciones, esta acción se realiza con la radio encendida y la batería del VANT conectada. Se comprueba como desplazando el interruptor en las 3 posiciones, en iNav se

desplaza a lo largo de todo el recorrido del canal. Con los dos botones de ajuste de umbral (barra azul) véase figura 61, se selecciona la zona donde queremos que actúe, en este caso en la zona final del recorrido (1700-2100). Así que hasta que no se mueva el interruptor a la tercera posición, el cuadricóptero no se armará para que pueda despegar. Dicho proceso se repite en la selección de todos los modos de vuelo.



Figura 61. Función de armado canal 5 iNav (fuente propia).

El software iNav me permite combinar canales para generar modos de vuelo personalizado según la función a cumplir de la aeronave para el caso del Escorpión en el canal 6 se combinó el modo de vuelo “Angle” con todos los modos de vuelo asignados a cada posición del interruptor para lograr una nivelación automática de los canales de balanceo y cabeceo logrando un vuelo nivelado con solo dejar las palancas centradas.

En la primera posición del interruptor se asignó el modo de navegación “Nav Althold” que cuando se activa la aeronave mantiene su altitud real a menos que se mueva el acelerador. Por otra parte, en la posición 2 se combinó el modo “Nav poshold” y “Heading Hold” el primero permite retener la aeronave en la misma posición a menos que los sticks estén desplazados y al estar combinados se bloqueara el rumbo sin importar el movimiento. En la posición 3 se asignó “Nav WP” que permite que la aeronave vuele una secuencia de puntos definidos en la misión programada.

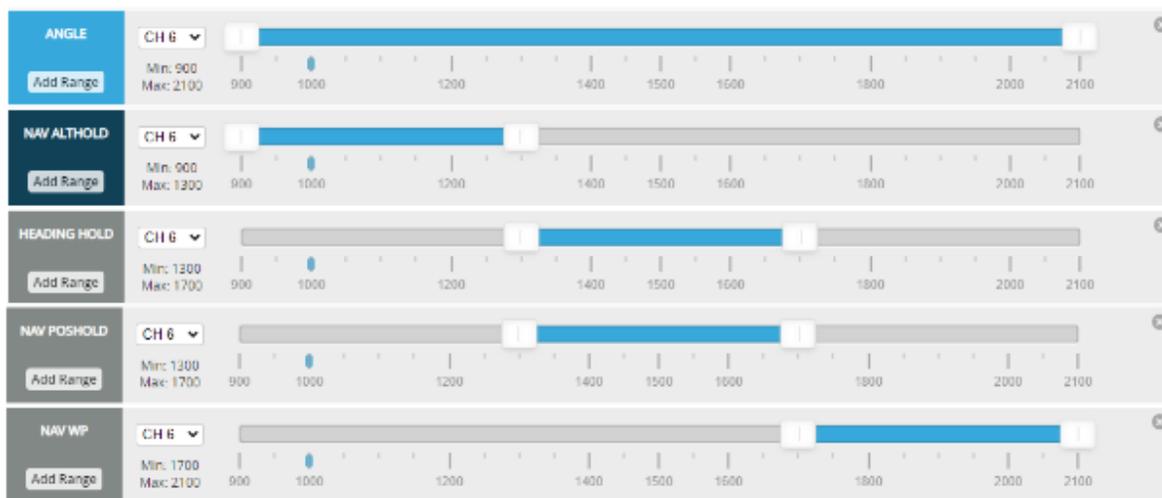


Figura 62. Ajuste del canal 6 iNav (fuente propia).

Así mismo, en el canal 7 se asignó el modo “Nav RTH” que al activarlo la aeronave interrumpirá la acción que esté haciendo y la llevará a la posición de lanzamiento (RTH) definidos previamente. RTH controlará tanto la posición como la altitud gracias al GPS y el barómetro.



Figura 63. Función de RTH canal 7 iNav (fuente propia).

Finalmente, en el canal 8 se asigna el modo de caja negra en donde se habitará la grabación de los datos de vuelo en el chip flash incorporado en la controladora de vuelo. Se deja a modo de interruptor con el fin de ahorrar espacio de almacenamiento pues solo registrará datos de vuelo cuando el modo esté activo.



Figura 64. Función de Caja Negra canal 8 iNav (fuente propia).

En el apartado del Anexo 5 se puede observar la explicación y correcto funcionamiento de los interruptores y asignación de canales de transmisión.

5.2.1.11. GPS

Previamente se configuro el módulo de posicionamiento global de la aeronave por lo que en el apartado GPS de iNav se debería observar en un mapa, la posición real de la aeronave al igual que algunas características del lugar, como se puede apreciar en la figura 65.

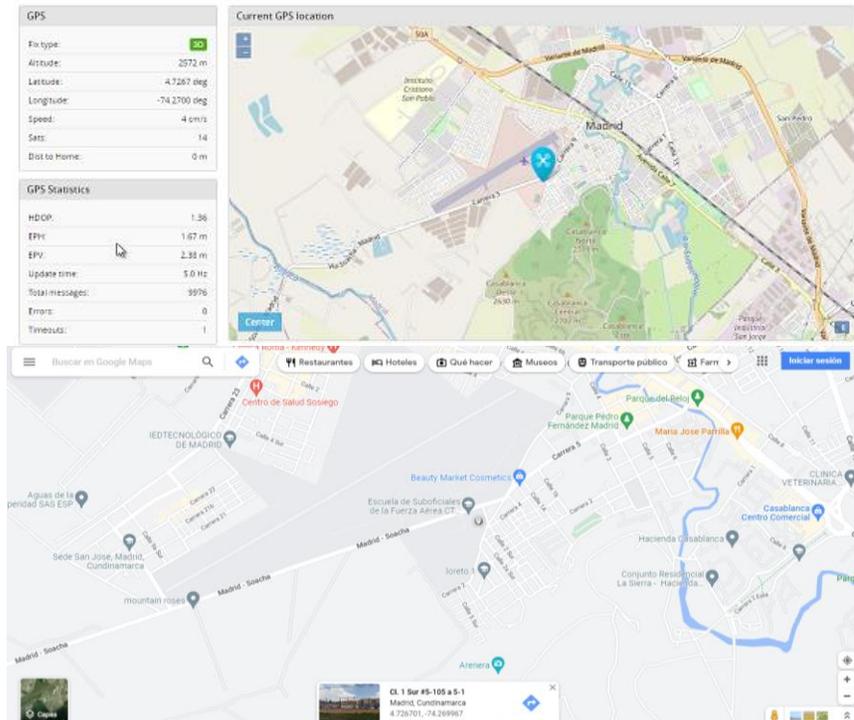


Figura 65. Posicionamiento global del VANT (fuente propia).

Se verifico también la precisión de la ubicación con ayuda de Google Maps desde Android determinando que la geo-posición del módulo M8N es muy acertada de acuerdo con las coordenadas de latitud y longitud.

5.2.1.12. Misión de vuelo programada

En el apartado de “Mission Control” de iNav se desarrollará todos los ajustes relacionado con la ruta programada, pieza fundamental de desarrollo de unos de los objetivos del proyecto. Una vez ubicado en este apartado se observará un mapa con el icono de nuestro VANT, se corrobora que el barómetro efectivamente se encuentre bien calibrado y que el norte este apuntando en la dirección correcta en la figura 66 se puede apreciar la orientación de la aeronave y algunos datos relacionadas a esta.

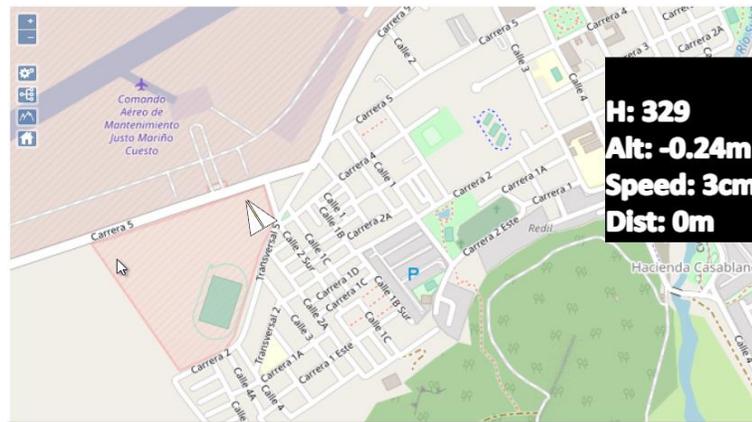


Figura 66. Orientación del VANT en el mapa iNav (fuente propia).

Desde este apartado de Inav se puede guardar/cargar un archivo de misión de vuelo desde la laptop, guardar/cargar misión de vuelo de la memoria flash de la controladora de vuelo y guardar/cargar misión de vuelo de la memoria Eprom de la controladora. Inav me permite grabar hasta 120 puntos de referencia para la misión de vuelo, de igual forma permite establecer una configuración de altitud, velocidad y radio por defecto en todos los puntos o definir dichos parámetros en cada uno de los waypoints, se definió una velocidad de 25 Km/h y una altura de 2m para todos los puntos de la misión de vuelo como se puede observar en la figura 67 y se guarda el ajuste.

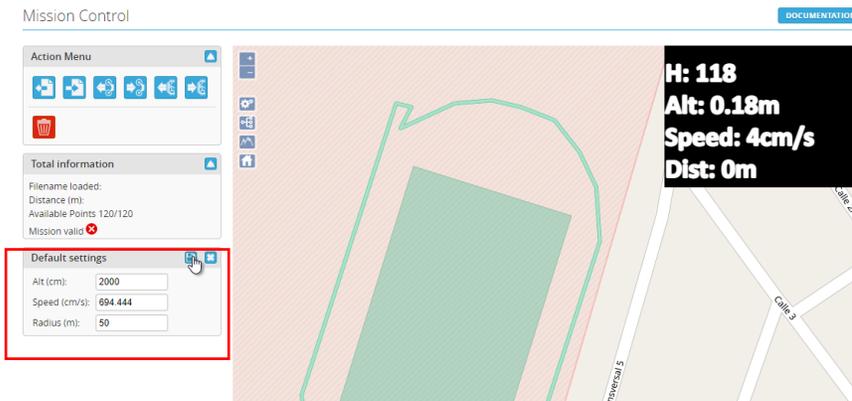


Figura 67. Ajuste de la misión de vuelo iNav (fuente propia).

Luego se define las coordenadas del punto donde la aeronave retornara a casa para ello se seleccionó un punto de la cancha de futbol de ESUFA ya que es un área despejada y se presta para hacer pruebas de vuelo. Posteriormente se ubican los puntos de referencia verificando que los ajustes necesarios en cada punto y en el último waypoint se indica que luego de pasar por ese punto retorne a casa para ello se selecciona la opción RTH como se aprecia en la figura 68.

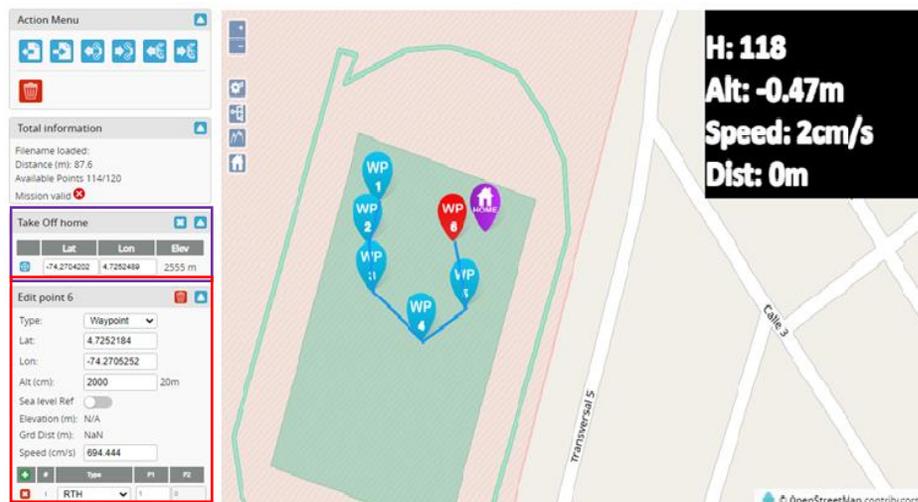


Figura 68. Configuración de Waypoints y RTH iNav (fuente propia).

Finalmente, se guarda la misión de vuelo en la opción de memoria flash y si los ajustes de misión de vuelo fueron correctos debe aparecer que la misión es válida además se comprobó que al desconectar y volver a conectar la controladora a iNav la misión de vuelo efectivamente quedo almacenada en la tarjeta.

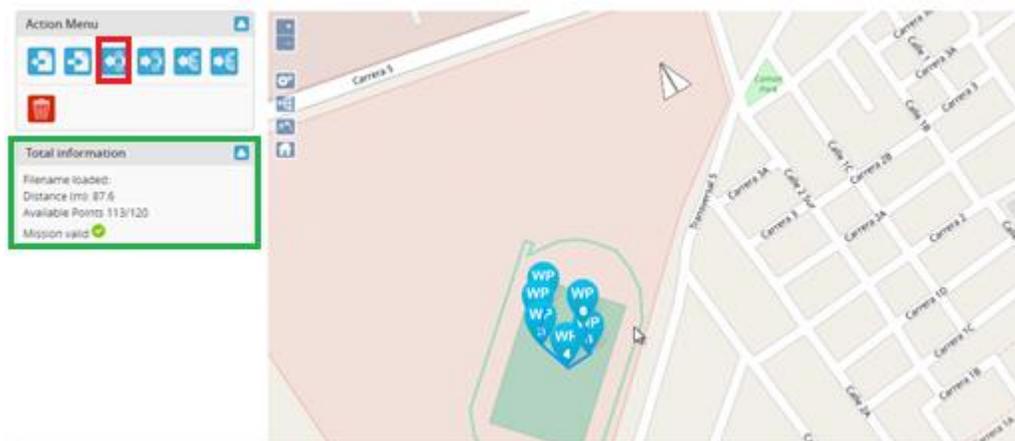


Figura 69. Misión de vuelo almacenada en la controladora desde iNav (fuente propia).

El video referido a la configuración de los puntos de referencia para una misión de vuelo desde iNav se puede observar en el Anexo 6.

5.2.1.13. OSD

En el apartado de OSD (Visualización en pantalla) de iNav se personaliza la visualización por pantalla generando ajustes bien sea por la interfaz gráfica del software o por sentencias de código desde el CLI. Mediante la interfaz gráfica se logró personalizar la visualización dejando en pantalla los datos más considerables para el VANT Escorpión como el nivel de batería, modo de vuelo, mensajes del sistema, satélites GPS, nivel del acelerador, tiempo de vuelo, radar, horizonte artificial, entre otros.

Se habilitó un diseño predeterminado y se fueron habilitando los datos que se querían visualizar en la pantalla FPV como se observa en la figura 70.

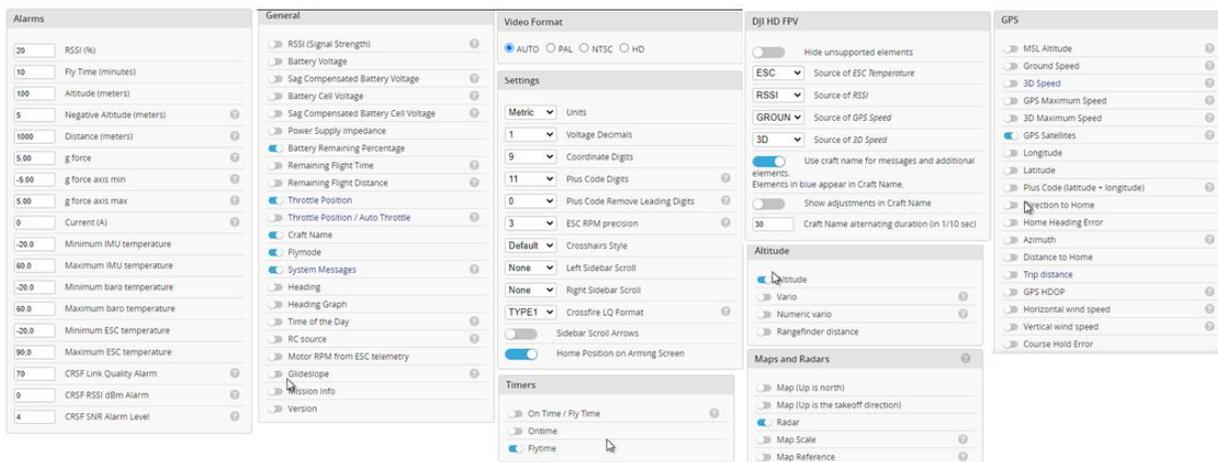


Figura 70. Configuración de la visualización en la pantalla FPV (fuente propia).

Una vez se ajustó y se seleccionó los datos a observar en la pantalla FPV, iNav permite visualizar dicha información en una vista previa y arrastrar la información para ubicarla dentro del tamaño de la pantalla. Una vez se obtiene el ajuste deseado se guarda la configuración y se visualiza nuevamente tanto en la pantalla de iNav como en la pantalla FPV. El video referido al funcionamiento de la visualización por pantalla se encuentra en el Anexo 7.



Figura 71. Visualización del ajuste del OSD en pantalla (fuente propia).

5.2.1.14. Sensores

Inav permite generar gráficas y visualizar trazos del comportamiento de los sensores del VANT desde el apartado “Sensors” allí indicamos que se grafiquen únicamente los sensores giroscopio, acelerómetro, magnetómetro y barómetro, para así ahorrar el consumo de recursos de la laptop y se generaron periodos de actualización de 50 ms a una escala de 2000.

Tras generar movimientos en la aeronave se observa que los sensores actúan y se generan trazos de mediciones que se evidencian a continuación.

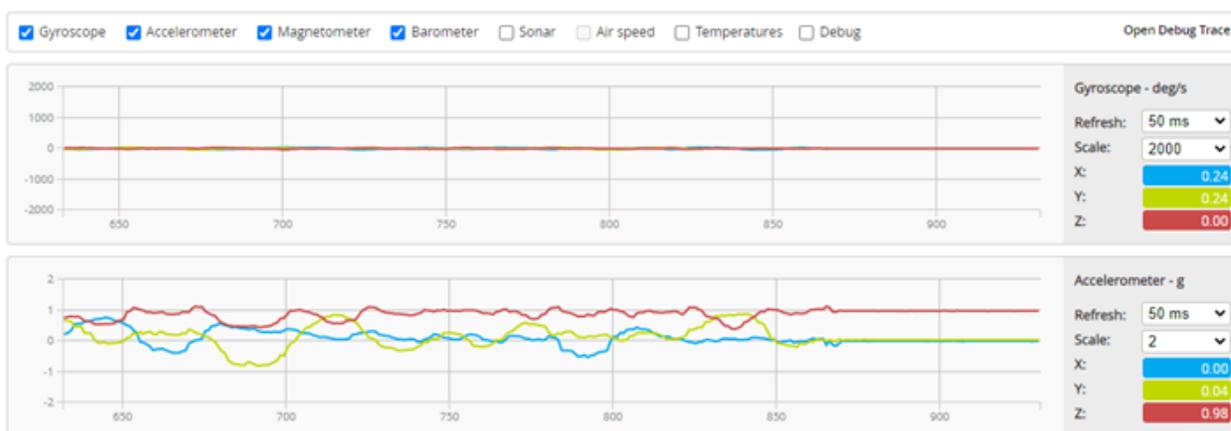


Figura 72. Gráficas de los sensores giroscopio y acelerómetro (fuente propia).

El sensor giroscopio mide la velocidad de rotación del VANT que está dada en $^{\circ}/s$, donde $1^{\circ}/s$ equivale aproximadamente a 0,166 rpm. El acelerómetro mide la tasa de cambio de la velocidad

del VANT que está dada en fuerzas G (g), donde 1 g equivale aproximadamente a 9,81 m/s². En las gráficas de la figura 72 se observa las variaciones de los sensores en los tres ejes coordenados.

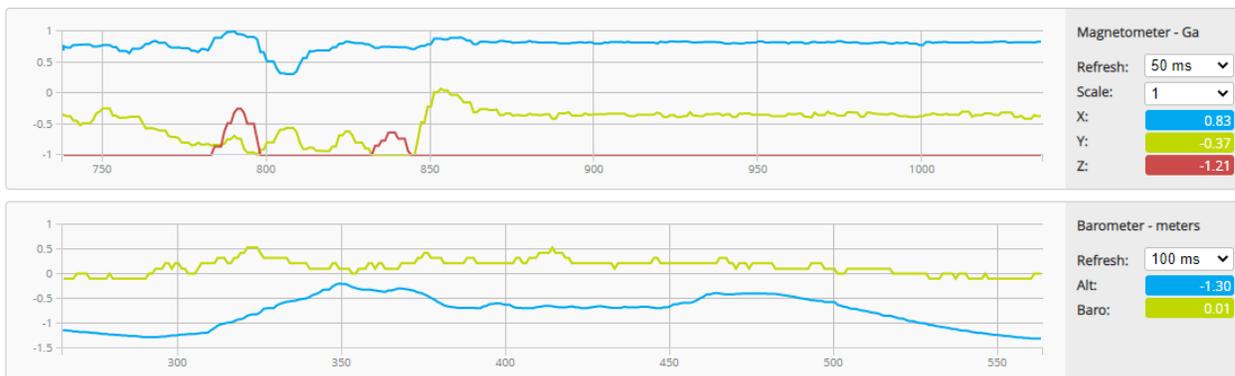


Figura 73. Gráficas de los sensores magnetómetro y barómetro (fuente propia).

En la figura 73 se aprecia la trazabilidad del sensor magnetómetro que hace la función de brújula electrónica para detectar el norte magnético de la tierra, está dado en la unidad de densidad de flujo magnético Gauss (Ga). El barómetro mide la presión atmosférica y la diferencia de altitud del VANT respecto al suelo, está dado en unidades de m. Se observa que todos los sensores están funcionando y queda por hacer prueba de vuelo. El video referido a la comprobación del correcto funcionamiento de los sensores a bordo del VANT se encuentra en el Anexo 8.

5.2.1.15. Blackbox

Luego de configurar el modo de caja negra y de grabar los datos de vuelo de la aeronave, desde el apartado "Blackbox" de iNav se puede extraer la información de los datos de vuelo para luego analizarlos, para ello se habilita el registrador de datos de vuelo de caja negra y se indica que se almacenará los datos de caja negra en el chip flash de la controladora de vuelo, indicando también que se tendrá una tasa de registro del 50% en donde por cada 2 iteraciones del bucle principal, la controladora de vuelo leerá los estados de los sensores y hará una "iteración de registro" de Blackbox.

Blackbox configuration

Blackbox flight data recorder

On-board dataflash chip ▼ Blackbox logging device

1/2 (50%) ▼ Portion of flight loop iterations to log (logging rate)

Save and reboot

Outboard serial logging device

You can log to an external logging device (such as an OpenLog or compatible clone) by using a serial port. Configure the port on the Ports tab.

Onboard dataflash chip

Flight logs can be recorded to your flight controller's onboard dataflash chip.

Used space 312kB Free space 15.7MB

Erase flash Save flash to file...

Figura 74. Ajuste del apartado de caja negra en iNav (fuente propia).

Se puede observar en la figura 74 el espacio de almacenamiento usado de la memoria flash de la controladora de vuelo, así mismo se puede borrar la información o almacenarla en un servidor local mediante la opción “Save flash Chip” para posteriormente generar el análisis del comportamiento de vuelo.

5.2.1.16. CLI

Es la interfaz de línea de comandos de iNav que permite al igual que la interfaz gráfica del software cambiar la configuración y ajustar la controladora de vuelo. Desde el CLI se puede crear una copia de la configuración de la aeronave, esto es importante ya que, si la aeronave se resetea o sufre una baja, desde iNav se puede clonar la configuración de la controladora previamente guardada.

Para ello se digita el comando *diff all* para obtener la lista completa de la configuración de la aeronave, cuando se termine de enlistar se copea y se guarda en un archivo de texto para resguardar la información. Cuando se desee salvar dicha configuración, en el mismo CLI se pega la información y se digita el comando *save* para finalmente guardar la configuración en la nueva placa controladora. En el apartado del Anexo 9 se puede observar una copia de la configuración final del VANT Escorpión.

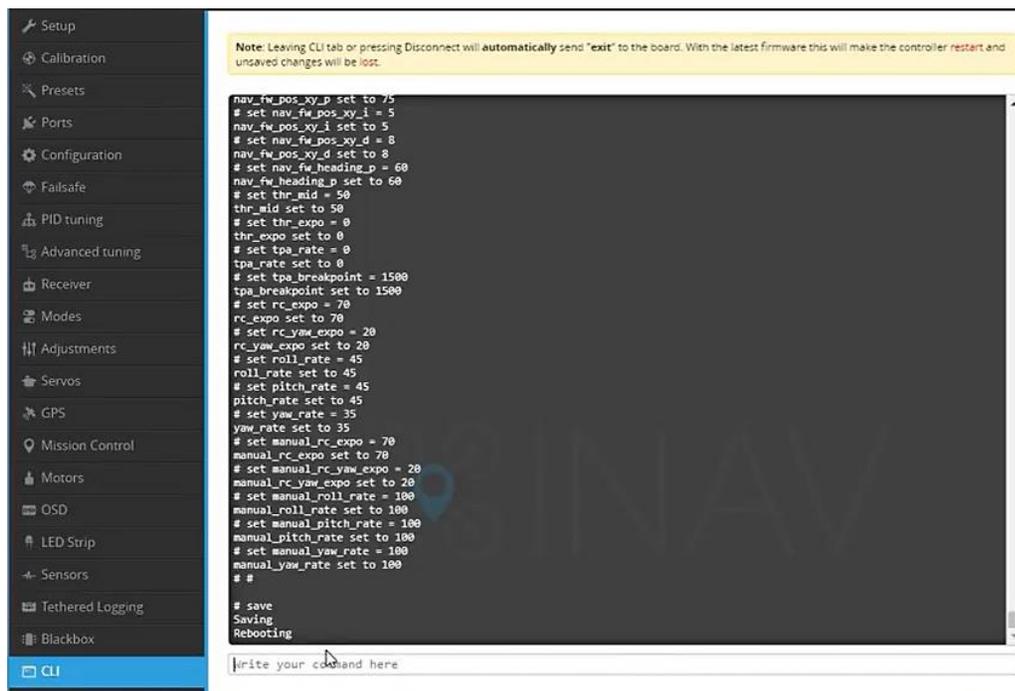


Figura 75. Respaldo de información desde CLI iNav (fuente propia).

5.2.2. Radio transmisor

Para enlazar el radio transmisor RM TX16S al receptor Flysky FS-iA6B primero se estudió el manual de uso y configuración de este radio control ya que fue una de las últimas adquisiciones del CETIA por lo cual no se tenía suficiente conocimiento de la configuración de este. Una vez se generó la capacitación del equipo se logró generar una personalización del equipo tales como cambiar el idioma y generar comentarios en idioma español, ajustar fecha y hora, definir los rangos de alertas de nivel de carga, ajustes de volumen y la frecuencia de los sonidos del equipo, definir el perfil para el VANT Escorpión y asignarle una imagen del mismo, como se aprecia en la figura 76.



Figura 76. Pantalla principal RadioMaste TX16s (fuente propia).

Adicional en el apartado de “Inputs” se asignan los canales de movimientos de alabeo, cabeceo, acelerador y guiñada a los sticks del control tal como se aprecia en la figura 77, y se ajustó el recorrido de las palancas en un 100%.



Figura 77. Ajuste de canales de movimiento del VANT (fuente propia).

El software del radio control permite ver un monitor de los canales en donde se verificó la correcta configuración de canales de movimientos y el recorrido de las palancas, como se evidencia en la imagen 78.



Figura 78. Configuración de los canales del sistema para los movimientos (fuente propia).

Otro paso importante en la configuración del radio transmisor es la calibración del mismo, esto con el fin de ajustar correctamente los niveles de sensibilidad de los sticks, interruptores y perillas. Para ello en el apartado “Hardware” de ajustes del sistema, se selecciona la opción de calibración y se procede a ubicar los dos sticks, los botones de flaps laterales del control y las perillas en un nivel central como se puede observar en la figura 79, luego de dar Enter, se procede a generar movimientos de estos mandos en todas las direcciones y finalmente el radio transmisor calibra sus mandos para enlazarlo al receptor. El video referido a la calibración del radio control se puede observar en el Anexo 10.



Figura 79. Calibración de mandos del radio transmisor (fuente propia).

Tras conectar el sistema de transmisión-recepción del VANT, ver figura 36, y configurar los parámetros del receptor en iNav previamente descritos, se procede a alimentar la placa ESC y energizar todos los sistemas de la aeronave. Se hace una conexión entre Bind y VCC para entrar en modo de enlace, ver figura 78, tras esto se observa que un led de color rojo en el receptor empieza a parpadear indicando que espera ser enlazado a un transmisor.



Figura 80. Conexión de modo enlace del receptor (autoría propia).

En el radio control desde el apartado de “Model Setup” se desplaza con ayuda de las perillas hasta la opción de “External RF Mode” para ajustar la radio frecuencia y se selecciona el modo de multiprotocolo interno “Multi” seleccionando el modelo del receptor “FISky2A” y se indica que se va transmitir por PWM/IBUS protocolo de comunicación bidireccional, como se evidencia en la figura 77.



Figura 81. Configuración del transmisor RM TX16S (fuente propia).

Así mismo en la figura anterior se observa que se configuró los movimientos del transmisor como AETR (alabeo, cabeceo, acelerador, guiñada) mismo ajuste del receptor en iNav, se definen 16 canales a usar, se elige el número del receptor como 00 y se presiona “Bind” luego de esto se observa que el receptor deja de ser intermitente y queda encendido de forma estática, lo que indica que el receptor y transmisor han sido enlazados, y se desconecta el puente de conexión de la figura 78. El video referido al enlace receptor-transmisor se encuentra en el Anexo 11. Por último, se procede a realizar el proceso de configuración del receptor en iNav previamente descrito para finalmente proceder con pruebas de vuelo.

5.2.3. BLHeli

Es un software que permite instalar y actualizar el firmware a los controladores electrónicos de velocidad (ESC), además de invertir el sentido de giro de los motores, de ser necesario, sin necesidad de cambiar las conexiones físicas de los motores.

Se instaló el configurador de BLHeli en su versión 1.2, el cual se extrajo del repositorio de Github oficial de la compañía y se ejecutó. Una vez instalado, se enlaza la aeronave por medio del puerto USB tipo C de la controladora de vuelo al ordenador y se conecta la batería a la placa PDB-ESC. Se accede a la aplicación en el apartado “Read Setup” y tras unos instantes de espera aparece la configuración los ESC para “flashear”²¹ con el nuevo firmware solo tenemos que ir a la web del fabricante e instalar el protocolo correspondiente en el caso de nuestro dron es el G-H-30 en la versión 16.7. En la siguiente imagen se muestra la conexión a BLHeli.

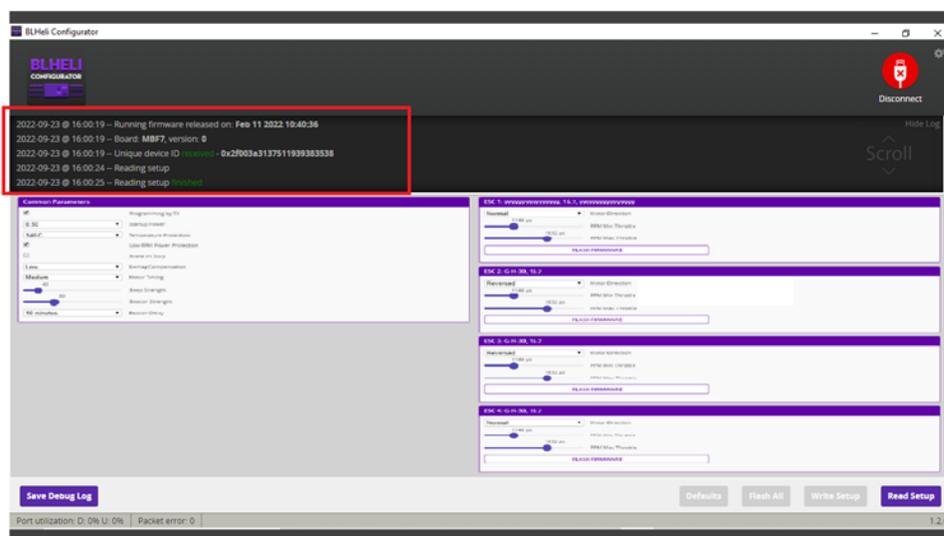


Figura 82. Validación de la conexión a BLHeli (fuente propia).

Tras verificar el sentido de giro de los motores en iNav se observó que 2 motores se encontraban girando en sentido opuesto al de la configuración de la figura 14, es por esto que desde BLHeli se

²¹ Cargar datos en un chip de memoria de dispositivos y periféricos electrónicos.

invierte el sentido en el apartado de “Motor Direction” y se selecciona la opción de revertir, como se puede ver en la figura 83.

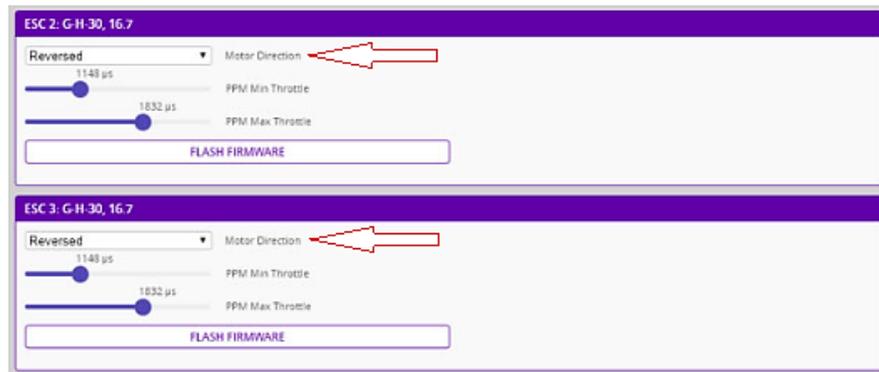


Figura 83. Inversión de sentido de giro ESC (fuente propia).

Finalmente, se selecciona la opción de “Write Setup” y por medio de software se habrá invertido el sentido de giro de los motores. Posteriormente desde iNav se comprueba que efectivamente los rotores están girando en el sentido deseado.

6. Pruebas y resultados

6.1. Propuesta definitiva

Inicialmente el VANT Escorpión fue fabricado e impreso en material PLA por temas de costo-beneficio para el proyecto, la resistencia de dicho material se comportó de manera adecuada a pesar que por desgaste fue evidenciado algunos despegues de las capas de impresión. Tras la adquisición por parte del CETIA de la impresora profesional 3D Mark Two la cual permite fabricar piezas de mejor acabado y de mayor resistencia a la flexión, se decidió por parte del comandante del CETIA y el grupo de trabajo que se imprimiera el diseño final del VANT en material Onyx con refuerzo de fibra de carbono en las vigas que soportan los rotores.

Con este material se logró alivianar la aeronave, generar mayor resistencia a golpes y refuerzos estructurales con fibra de carbono, mayor resistencia de temperatura de deflexión térmica y mejor acabado estético. Para la propuesta final del diseño del Escorpión se observó la necesidad de tapan la entrada de flujo de aire en la sección que almacena el barómetro con el fin de evitar malas lecturas de este, y acondicionar el módulo GPS Compass para que su ubicación fuera lo más lejano del campo magnético generado por los motores y la batería. Además, fue diseñado un soporte para la cámara Foxeer el cual permite ajustar el ángulo de captura del lente, permitiendo mejor captura de video, ver figura 84. Tras la elaboración del boceto final del VANT Escorpión en software y su posterior impresión en Onyx por parte de los compañeros de Ingeniería Aeronáutica se logró obtener el prototipo final, como se puede apreciar en la figura 85.



Figura 84. Piezas finales del frame del VANT impresas en material Onyx (fuente propia).

Posterior a la fabricación de las piezas, se ensambló la aeronave y se instalaron nuevamente los dispositivos de los sistemas electrónicos del VANT, se verificó la conexión y correcta configuración de dichos sistemas en iNav, se calibraron nuevamente los sensores acelerómetro y barómetro y se enlazo el receptor al radio transmisor para generar la prueba de vuelo de forma manual y posteriormente de manera programada.



Figura 85. Diseño Final del VANT impreso en Onyx (fuente propia).

Adicionalmente se incorporó a la aeronave un sensor de distancia Benewake Lidar TF-Luna, con el fin de tener un mejor control del despegue y aterrizaje en la aeronave según (TF-Luna 8m distance sensor, 2022) tiene rango operativo de (0,2–8) m que al ser un sensor lumínico es altamente preciso, estable y sensible en su medición. La propuesta definitiva del VANT Escorpión con todos los sistemas incorporados y la impresión de las partes en el nuevo material tuvo un peso final de 875 g como bien se puede observar en la figura 85. Adicionalmente el video del montaje final del Escorpión se encuentra en el Anexo 12.

El sensor Lidar se conectó a una interfaz de comunicación UART directamente a la controladora de vuelo y se configuró para la lectura de datos desde iNav.

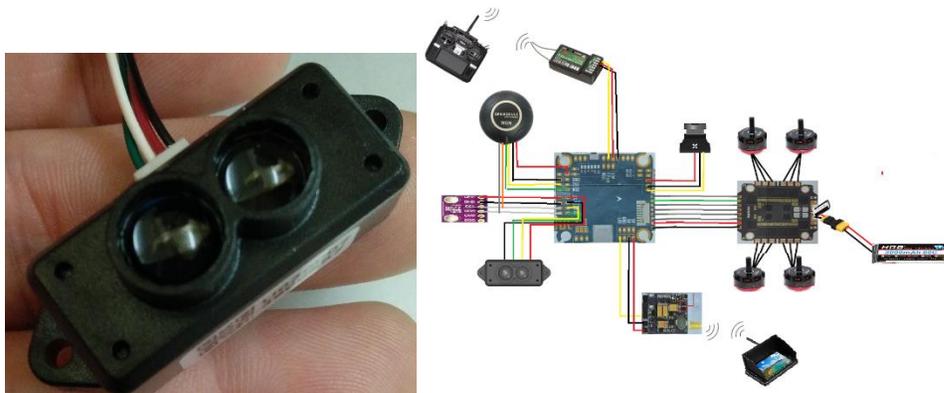


Figura 86. Sensor Lidar y conexión final del VANT Escorpión (autoría propia).

En el software iNav se configuró el puerto UART 5 como el puerto de lectura para el sensor de distancia a una velocidad de 115200 baudios, así mismo en el apartado de configuración se seleccionó el tipo de sensor y parámetros de configuración, como se puede observar a continuación.

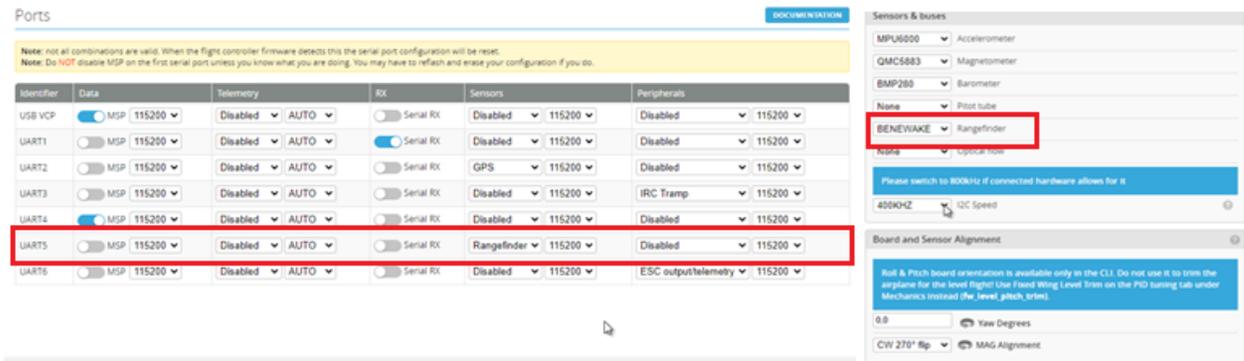


Figura 87. Configuración sensor Lidar Benewake desde iNAV (fuente propia).

Una vez se ajustaron y se configuraron los nuevos cambios en la aeronave, se procedió a generar las pruebas de vuelo tanto manual como programada, como bien se describe a continuación.

6.2. Fase III: Validación del desempeño de los sistemas de control y telemetría mediante pruebas de vuelo

6.2.1. Prueba de eficiencia para selección de rotores

La selección de los rotores fue pieza fundamental para generar la mayor autonomía posible en la aeronave, para ello se trabajó en conjunto con los compañeros de la disciplina de aeronáutica logrando generar pruebas prácticas para evaluar la eficiencia de cuatro diferentes motores brushless: XING-E Pro 2306 2450 KV, Flash Hobby King 2306 2300 KV, Emax Eco S 2207 2400 Kv y RS2205 - 2300 Kv, así finalmente seleccionar el más acorde para el proyecto. Gracias al banco de pruebas de rpm y potencia para motores de la marca “Racerstar” con el que cuenta el CETIA fue posible generar dicho estudio practico el cual consistió en instalar cado uno de los 4 motores en el soporte del banco unido a una hélice bipala de 4” de diámetro y 4.5” de ángulo de ataque, el sistema se alimentó a 16.8 V mediante una fuente de voltaje.

El banco está conectado a un controlador electrónico de velocidad (ESC) que une a los tres pines de alimentación del motor, los pines de señal del ESC se conectan a las salidas de un receptor Flysky FS-iA6B el cual esta enlazado a un radio transmisor de donde se generan los impulsos de aceleración del motor, de esta manera se varía el recorrido del stick del radio transmisor y se genera lectura de valores de empuje y corriente mientras se observa el porcentaje de velocidad en cada caso. Es así como se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 6
Motor XING-E Pro 2306 2450 KV

Voltaje	Hélice	Corriente (A)	Empuje (g)	Potencia (W)	Eficiencia (g/W)	Velocidad (%)
16,8		7,07	502	118,776	4,22644305	50

HQ4045	10,87	673	182,616	3,68532878	60
BN	15,42	884	259,056	3,4123896	70
	21,02	1085	353,136	3,07247066	80
	27,35	1299	459,48	2,82710891	90
	34,82	1482	584,976	2,53343727	100

Nota. Tabla de los parámetros del motor en mención.

Tabla 7
Motor Flash Hobby King 2306 2300 KV

Voltaje	Hélice	Corriente (A)	Empuje (g)	Potencia (W)	Eficiencia (g/W)	Velocidad (%)
16,8	HQ4045	4,39	390	73,752	5,28799219	50
	BN	7,03	537	118,104	4,54684007	60
		11,42	707	191,856	3,68505546	70
		15,56	860	261,408	3,28987636	80
		20,36	1008	342,048	2,94695481	90
		20,43	1009	343,224	2,93977111	100

Nota. Tabla de los parámetros del motor en mención.

Tabla 8
Motor Emax Eco S 2207 2400 Kv

Voltaje	Hélice	Corriente (A)	Empuje (g)	Potencia (W)	Eficiencia (g/W)	Velocidad (%)
16,8	HQ4045	4,8	300	80,64	3,7202381	45,5
	BN	9,3	500	156,24	3,20020481	57,8
		14,1	700	236,88	2,95508274	66,8
		32,4	1320	544,32	2,42504409	100

Nota. Tabla de los parámetros del motor en mención.

Tabla 9
Motor RS2205 - 2300 Kv

Voltaje	Hélice	Corriente (A)	Empuje (g)	Potencia (W)	Eficiencia (g/W)	Velocidad (%)
16,8	HQ4045	5,1	435	85,68	5,07703081	56,6
	BN	9,11	641	153,048	4,18822853	69,2
		13,1	767	220,08	3,48509633	78,6
		17,2	898	288,96	3,10769657	86,5
		21,1	1084	354,48	3,05800045	97,1
		23,2	1103	389,76	2,82994663	100

Nota. Tabla de los parámetros del motor en mención.

De la tabulación de los parámetros obtenidos para cada motor se generaron sus respectivas Gráficas comparando en cada caso la eficiencia, corriente y empuje respecto al porcentaje de velocidad del acelerador del radio control, obteniendo los siguientes resultados.

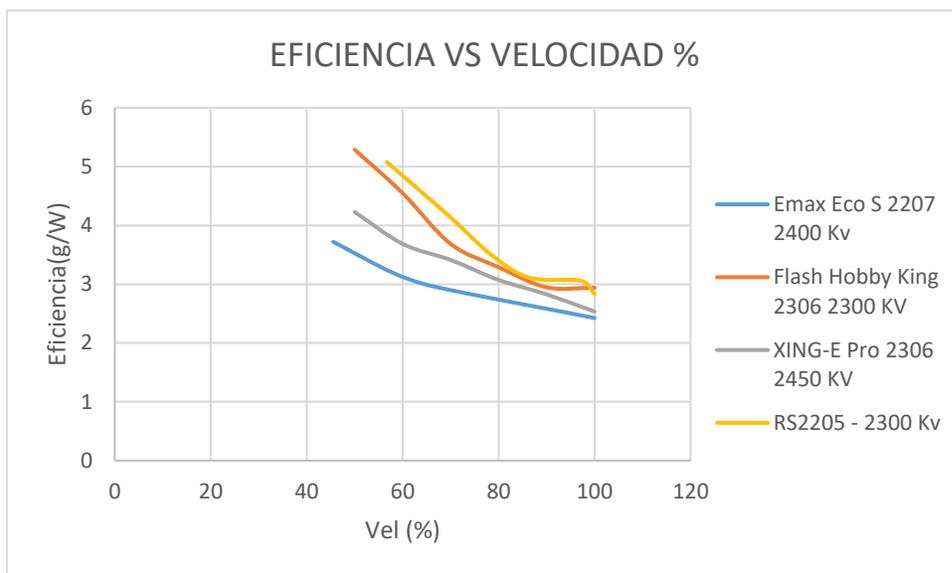


Figura 88. Gráfica de eficiencia vs porcentaje de velocidad del acelerador (fuente propia).

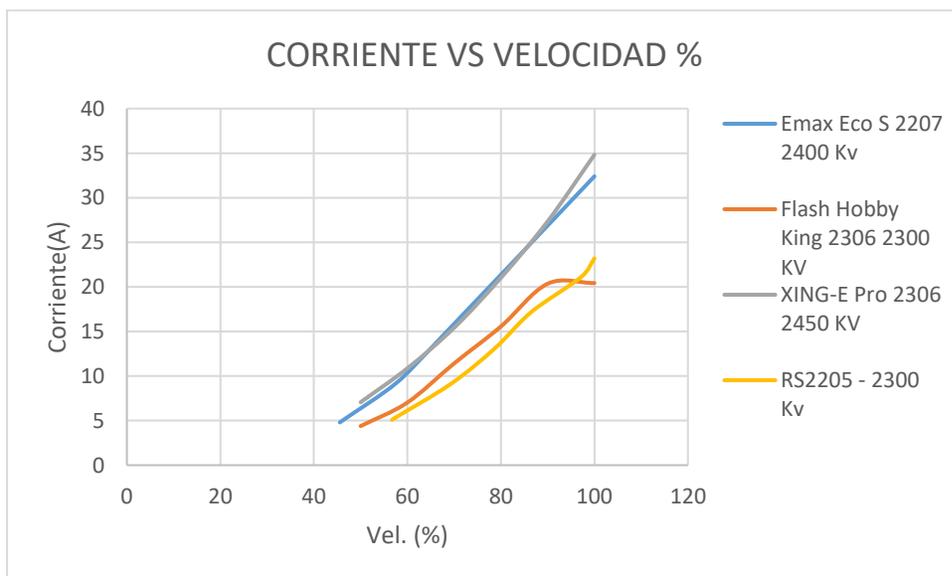


Figura 89. Gráfica de corriente vs porcentaje de velocidad del acelerador (fuente propia).

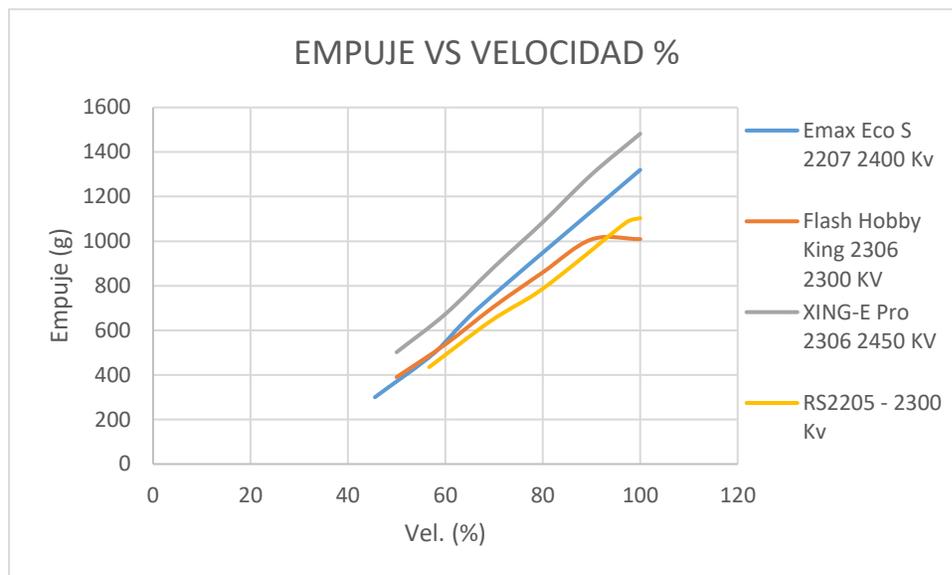


Figura 90. Gráfica de empuje vs porcentaje de velocidad del acelerador (fuente propia).

De los resultados obtenidos de las pruebas prácticas de eficiencia de los cuatro motores se obtuvo que en cuanto a eficiencia el motor RS2205 presenta la mejor regularidad en la curva, en la figura 88 se observa que a pesar de que el motor FHK 2306 presente un alto índice de eficiencia en bajas velocidades, el motor RS2205 mantiene su eficiencia superior a lo largo de la gráfica.

En cuanto al consumo de corriente se observa en la figura 89 que los motores que más consumen corriente respecto al porcentaje de velocidad son Emax2207 y Xing2306 respectivamente, lo que explica por qué las eficiencias de estos son inferiores respecto a los demás motores. Se determina de igual forma que el motor RS2205 es el que menos corriente consume respecto al porcentaje de velocidad.

Respecto al empuje se observa de la figura 90 que como era de esperarse los motores que más consumen corriente son aquellos que generan más empuje Emax2207 y Xing2306, a pesar de esto se analiza que el motor RS2205 tiene una gráfica creciente respecto a porcentaje de velocidad obtenido un máximo empuje de 1103 g a 23.2 A, que de acuerdo a la necesidad del VANT de levantar hasta 2 Kg es más que suficiente para suplir dicha tarea, además se busca optimizar el consumo y autonomía de carga por lo que se busca que los motores requieran la menor cantidad de corriente. Es por esto que junto con los miembros del proyecto se optó por implementar motores Emax RS2205 2300kv para el VANT Escorpión, la descripción del motor usado de detalle previamente en el documento en el apartado de *sistema de control de los rotores*.

6.2.2. Pruebas empuje para selección de hélices

Con el VANT Escorpión se busca transportar hasta 2 Kg de peso dependiendo de los sistemas a bordo y la misión que se dé a la aeronave. Como regla general se tiene que el empuje generado por los 4 motores debería ser como mínimo el doble del peso que se busca transportar en el

cuadricóptero es por esto el empuje total generado por los motores al 100% debería ser como mínimo de 2 Kg o 500 gramos por motor, aunque se cuenta con un buen umbral pues el VANT Escorpión tiene un peso final de 640 g.

Es por esto que una vez se seleccionó los motores a usar en la aeronave el paso siguiente fue la selección de hélices que permitieran generar un empuje de por lo menos 500 g, así mismo conseguir el menor consumo de corriente para generar la mayor autonomía en el VANT.

Para la realización de las pruebas se usó el banco de pruebas de rpm y potencia para motores de la marca “Racerstar” con el que cuenta el CETIA, en donde se instaló el motor brushless Emax RS2205 2300kv seleccionado en las pruebas de eficiencia. A Dicho motor se le probaron 4 tipos de hélices tripala con el fin de hacer un estudio practico para la selección de la más eficiente en cuanto al consumo de corriente y el empuje generado. El sistema de pruebas se alimentó con la batería LiPo de cuatro celdas a usar en el VANT con el fin de simular el consumo lo más cercano a la realidad. A continuación, se enuncian las hélices usadas para las pruebas.

- Hélice T4943: Es una hélice tripala de tipo CW/CCW, fabricada en policarbonato y cuenta con un diámetro de 4.9” y un ángulo de ataque de 4.3”.
- Hélice F4S 5.1": Es una hélice tripala de tipo CW/CCW, fabricada en policarbonato y cuenta con un diámetro de 5.1” y un ángulo de ataque de 3.6”.
- Hélice Dalprop Fold F5 5.1" plegable: Es una hélice tripala plegable de tipo CW/CCW, fabricada en policarbonato y cuenta con un diámetro de 5.1” y un ángulo de ataque de 4.75”.
- Hélice F5135: Es una hélice tripala plegable de tipo CW/CCW, fabricada en policarbonato y cuenta con un diámetro de 5.1” y un ángulo de ataque de 3.5”.

Al igual que en las pruebas de eficiencia para la selección de los motores, el banco se conectó a un controlador electrónico de velocidad (ESC) que une a los tres pines de alimentación del motor, los pines de señal del ESC se conectan a las salidas de un receptor Flysky FS-iA6B el cual esta enlazado a un radio transmisor de donde se generan los impulsos de aceleración del motor, de esta manera se varía el recorrido del stick del radio transmisor hasta un 75% y paralelamente se genera lectura de valores de empuje y corriente mientras se observa el porcentaje de velocidad en cada caso para su posterior tabulación. De esta manera se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 10

Prueba de selección de hélices

Hélice	Porcentaje de vel.	Corriente (A)	Empuje (g)
T 4943	25%	2,17	114
	50%	9,67	344
	75%	15,99	501
F4S 5.1"	25%	2,15	112
	50%	9,96	408
	75%	18,73	600

F5 5.1"	25%	2,53	126
	50%	9,32	351
	75%	17,85	537
F5135	25%	2,42	122
	50%	9,81	412
	75%	18,74	592

Nota. Tabla de los valores de corriente y empuje generado por cada hélice.

De la tabulación de los valores obtenidos de cada hélice se generaron las respectivas Gráficas comparando en cada caso la corriente consumida y empuje generado respecto al porcentaje de velocidad del acelerador del radio control, obteniendo las siguientes gráficas.

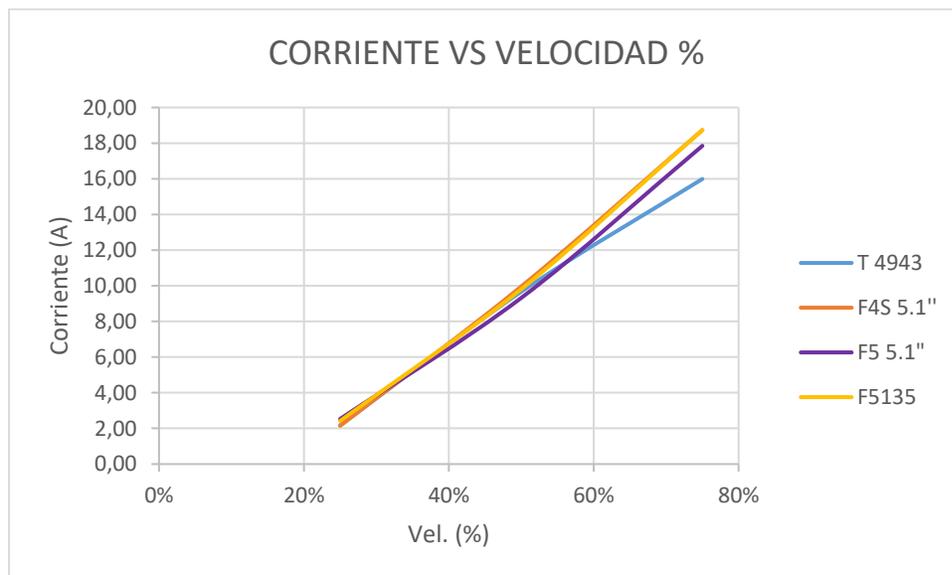


Figura 91. Gráfica de corriente vs porcentaje de velocidad del acelerador (fuente propia).

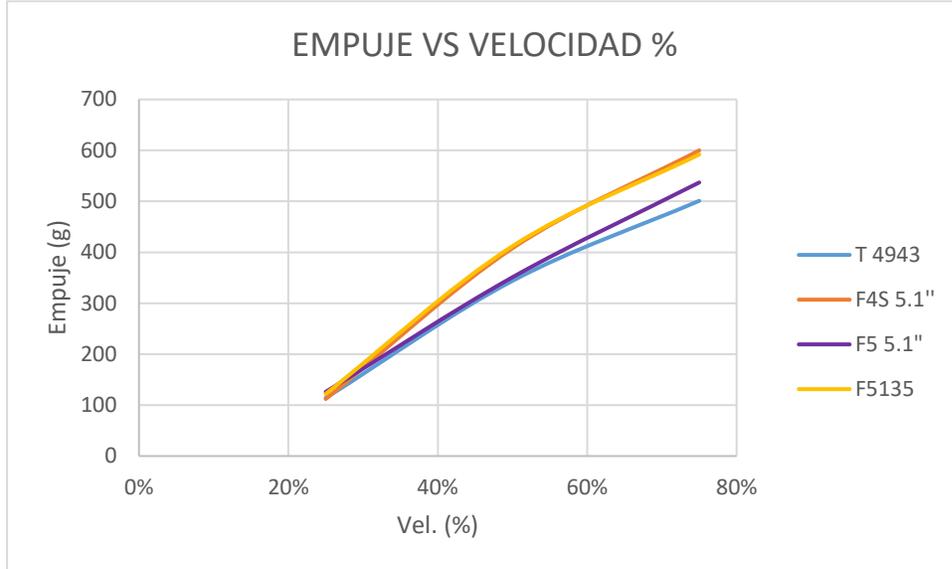


Figura 92. Gráfica de empuje vs porcentaje de velocidad del acelerador (fuente propia).

De los resultados obtenidos en cuanto al consumo de corriente se observa en la figura 91 que las hélices que generan más consumo de corriente en el motor respecto al porcentaje de velocidad son F5135 y F5 5.1" respectivamente. Se determina de igual forma que la hélice T4943 es la que menos corriente consumo de corriente genera.

Respecto al empuje se observa en la figura 92 que las hélices que más consumen corriente, generan mayor empuje a pesar de eso se puede evidenciar que la hélice T4943 en un 75% de recorrido del acelerador genera poca más de 500 g al igual que la hélice F5 5.1". De acuerdo a la necesidad del VANT para generar un empuje de 500g por motor y optimizar el consumo de energía, se opta por implementar el uso de la tripala T4943 ya que en las pruebas es la que menos consumo en el motor genera y adicional genera un empuje de 500g por motor, suficiente para generar la sustentación del peso máximo a levantar en el VANT. En el Anexo 13 se puede observar la prueba de empuje de una de las hélices con ayuda del banco de motores Racerstar.

6.2.3. Pruebas de vuelo

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de los sistemas de la aeronave se generaron dos tipos de pruebas de vuelo, la primera de ellas consistió en probar los distintos modos de vuelo de manera manual desde el radio control, una vez se garantizó un vuelo estable se generaron pruebas de vuelo mediante puntos de referencia (waypoints) en un área determinada; y así generar los ajustes correspondientes y el análisis de la trazabilidad del vuelo gracias al almacenamiento en la caja negra, en donde se almacena toda la información de vuelo en logs de tiempo registrando datos como la hora del vuelo, correcciones PID de cada eje, los movimientos de radio control, datos del giroscopio, acelerómetro, barómetro y el comportamiento en general de los 4 motores (Spsychalski, 2022). Para poder visualizar los datos de vuelo se generó una investigación encontrando una herramienta de iNav llamada "Blackbox flight data recorder", la cual es de libre descarga y

compatible para Windows. Luego del proceso de descarga y configuración de la herramienta se procede a cargar los archivos de los datos almacenados de la Blackbox y se analiza la información recolectada. En los Anexos 14 y 15 se pueden observar los archivos de la Blackbox de los datos de la prueba Manual de vuelo en la Fase 1 y en el Anexo 16 los datos de vuelo de la Fase 2. Por otra parte, los datos de Blackbox de la prueba programa se puede evidenciar en el Anexo 17.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos de las pruebas se generaron las respectivas conclusiones.

6.2.3.1. Prueba de vuelo Manual

Luego de las fases de selección y conexión de los dispositivos de los sistemas a bordo y su posterior fase de configuración desde iNav, se procede a generar dos fases de pruebas de vuelo en la aeronave. La primera fase inicia con una prueba manual controlando la aeronave desde el radio control verificando en primer lugar que la aeronave despegue y se sustente de manera correcta, al igual que los sensores y el posicionamiento global funcionen adecuadamente. La segunda fase consiste en pilotar la aeronave desde el radio control de manera libre verificando los movimientos de alabeo, cabeceo y guiñada.

Fase 1

Esta primera fase se desarrolló bajo la supervisión de un piloto de drones de la FAC, el cual realizó los primeros movimientos en la aeronave. La prueba inició haciendo una lista de chequeo de prevuelo verificando que el espacio aéreo donde se va a pilotar estuviese despejado, de igual forma se revisa que en el VANT todos los sistemas se encuentren bien conectados, que las 4 hélices estén en la correcta disposición y que los rotores giren sin fricción. Del radio control se verifica que las palancas e interruptores estén funcionando correctamente, y se comprueba que estén enlazados el transmisor y receptor así mismo que tanto la batería del control como la del VANT estén cargadas. Una vez realizado el chequeo, el VANT se encuentra listo para despegarlo para ello se energiza el sistema, se arman los motores y se activa el interruptor de blackbox, a medida que el piloto va asciendo la palanca de aceleración se observa que la aeronave empieza ascender en altura en un primer momento de manera inestable llegando a ser difícil controlar, durante el vuelo se observó también vibraciones y asimetría en la manera de girar los motores, por lo que se aterrizó y analizó los parámetros de vuelo.

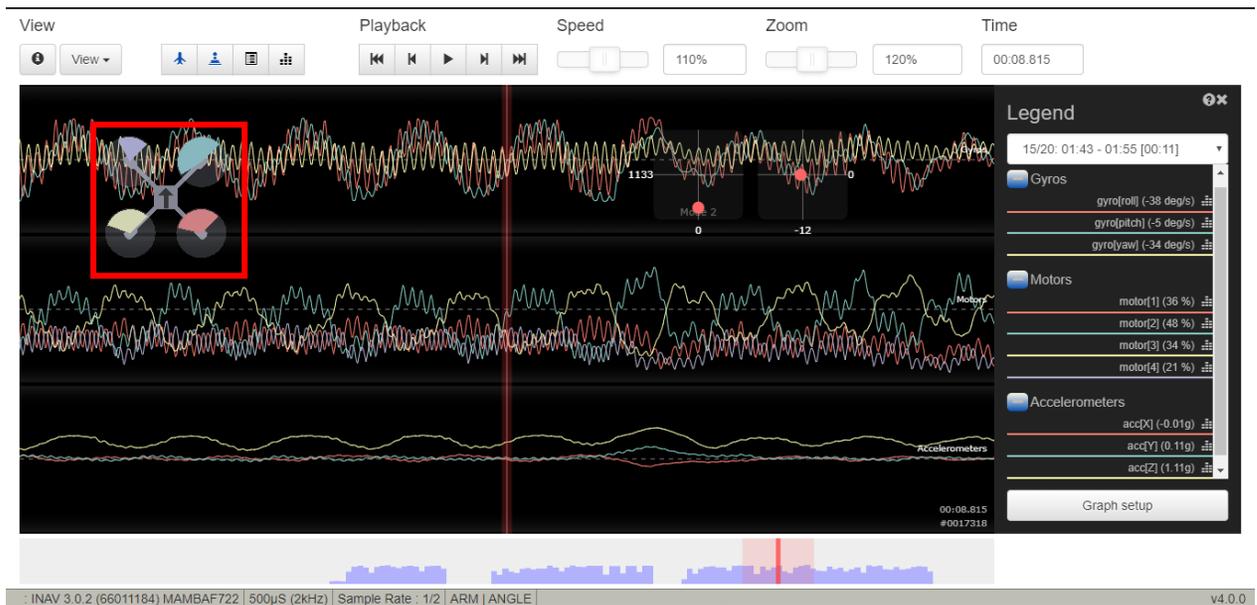


Figura 93. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox (fuente propia).

Durante el análisis de la información almacenada del vuelo se observó que se dificultaba el mantener la orientación de la aeronave pues el giroscopio muestra picos en la velocidad de la rotación en cada uno de los tres movimientos (pitch, roll, yaw), lo que debería ser una gráfica más estable. En cuanto a lo que se observó de la asimetría del giro de los motores en vuelo se corroboró en los datos de la Blackbox, en la figura 93 se observa que la gráfica de los motores cuenta con mucho ruido y desigualdad en los picos de las señales, además se observa en el monitor que representa el movimiento de la aeronave que los motores giran a diferentes porcentajes de velocidad lo que crea la inestabilidad de la aeronave

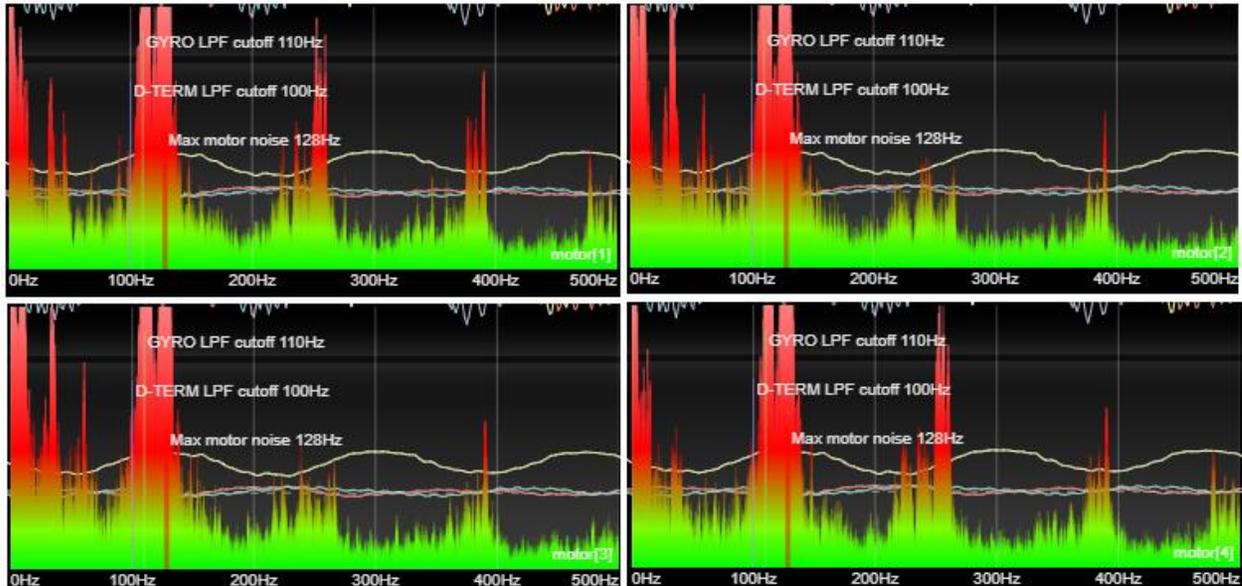


Figura 94. Visualización de las estadísticas de los motores (fuente propia).

Así mismo en la figura 94 se observa que efectivamente en los 4 motores se genera un ruido eléctrico consecuencia del mal sensado del giroscopio lo que genera altos picos de señales para estabilizar la aeronave, además se presume que hay que corregir el control PID de los motores de la aeronave y revisar el estado mecánico de los motores. Respecto al sensor acelerómetro se puede observar que está funcionando correctamente y está detectando las señales que generan las fuerzas externas en los 3 ejes de la aeronave, en el caso de la prueba la fuerza ejercida por el viento.

Luego de analizar el comportamiento de los sensores y motores en la aeronave, se procedió a desmontar los motores y generar una limpieza del embobinado de cada uno mediante un soplador de aire, además se generó una nueva calibración del módulo giroscopio y acelerómetro mediante iNav por otra parte el equipo de la especialidad de Aeronáutica realizó un ajuste en los parámetros del controlador PID de la aeronave desde iNav, para corregir las novedades de los motores y realizar otra prueba de vuelo.

Tras los ajustes realizados a la aeronave se generó una nueva prueba de vuelo para evaluar el ascenso y la sustentación de la misma, en esta oportunidad se evidencio un mejor comportamiento de la aeronave pues visualmente los motores trabajaron coordinados. El piloto de la aeronave tras generar el impulso de la aceleración logró un despeje vertical de manera estable y controlable del VANT, luego de ello se cambió a la segunda posición el modo de vuelo desde el radio control (Nav poshold, Heading Hold), ver tabla 5, logrando que la aeronave a pesar de las corrientes de aire se sustentara y mantuviera la posición corroborando el correcto funcionamiento del sistema de navegación, finalizando así la primera fase de la prueba manual de vuelo.

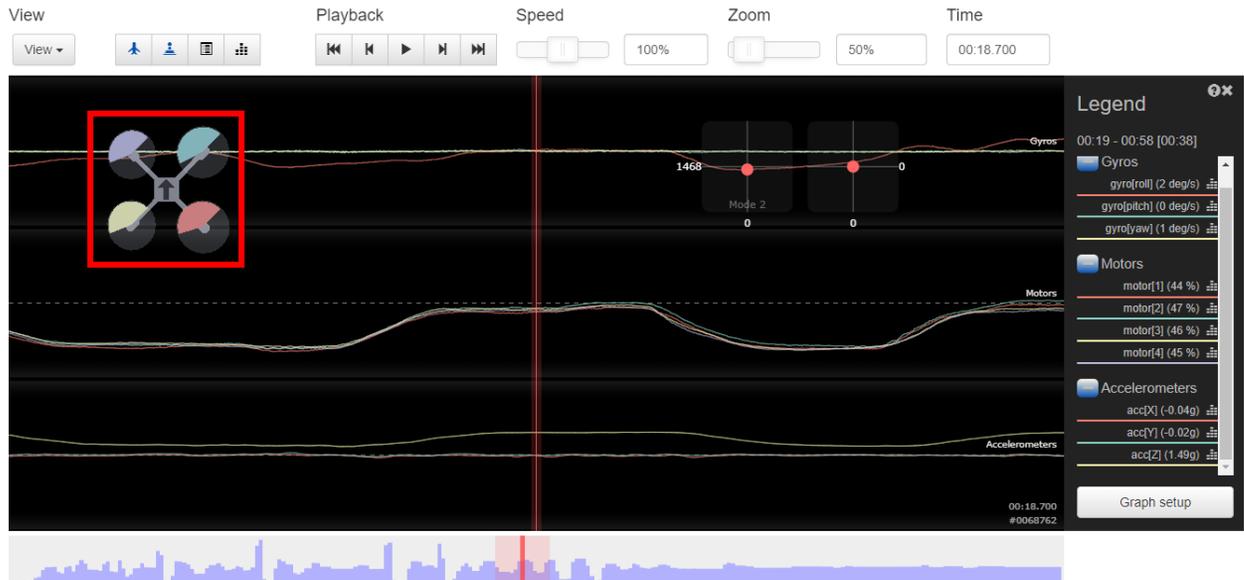


Figura 95. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox (fuente propia).

En la figura 95 se observa la información almacenada del vuelo, evidenciando que en esta oportunidad la gráfica de las señales de los movimientos pitch, roll y yaw son más estables, es por esto que la aeronave se orientó de mejor manera. Así mismo se evidenció simetría en la gráfica de la señal de los 4 motores a lo largo de toda la captura de datos y se observa en el monitor que representa el movimiento de la aeronave que los motores giran coordinados lo cual se refleja en los porcentajes de velocidad, lo que se traduce en un buen comportamiento de ascenso y que la aeronave se sustente correctamente.

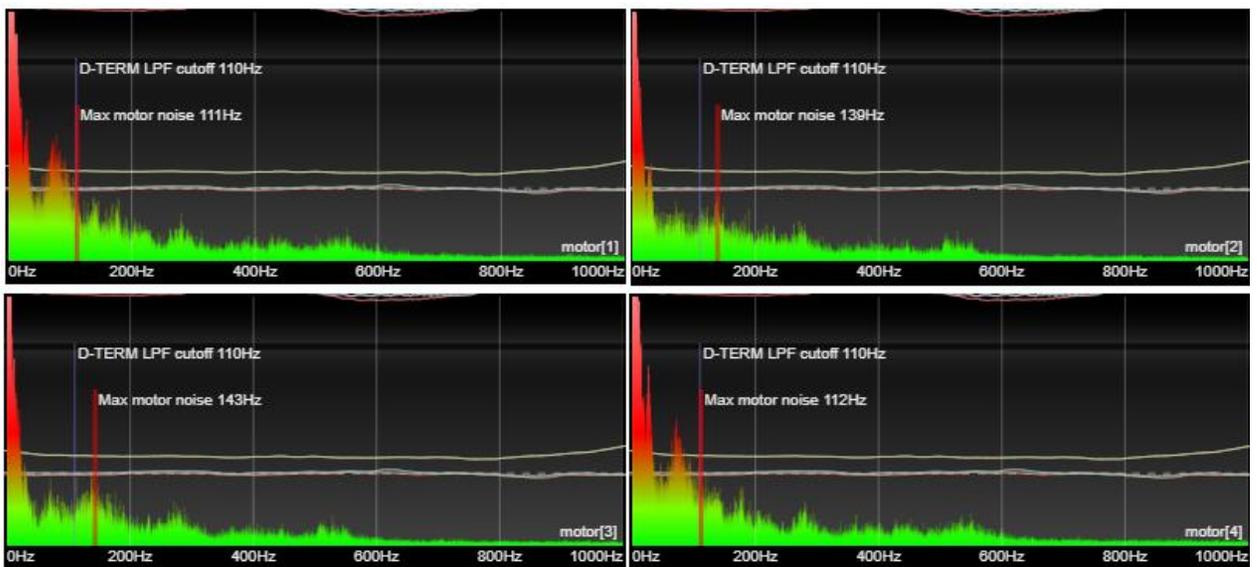


Figura 96. Visualización de las estadísticas de los motores (fuente propia).

En la figura 96 se visualiza las estadísticas del comportamiento de los 4 motores durante el vuelo, se evidencia que el ruido generado es inferior al de la prueba anterior con simetría en las cuatro gráficas, a lo largo de la gráfica se evidencia que el ruido de los motores luego de cierto lapso de tiempo se estabiliza, comportamiento que no se evidenció en la prueba anterior. Respecto al sensor acelerómetro en la figura 95 se puede observar que este detecta las variaciones de la aceleración vertical de ascenso y descenso como se refleja en la señal amarilla acc[Z], al no generar movimientos en la aeronave se observa que las señales acc[X] y acc[Y] son casi nulas, se concluye que los sensores giroscopio, acelerómetro y modulo gps están funcionando correctamente y que la aeronave se encuentra acorde para la realización de la fase 2. Los videos referidos a las pruebas de la fase 1 se pueden observar en el Anexo 18 y Anexo 19.

Fase 2

Para la segunda fase de la prueba de vuelo manual se pilotó la aeronave teledirigida por un experto de la FAC desde el radio control, en donde se buscó verificar los movimientos de alabeo, cabeceo y guiñada de manera libre. La prueba inicio al igual que la fase anterior, con un chequeo de prevuelo, una vez se comprobó que era seguro pilotar se energizo la aeronave y se armaron los motores seguidamente se activó el interruptor de grabación de Blackbox para almacenar los datos del comportamiento de la aeronave en vuelo. La aeronave se pilotó en modo *Althold* el cual mantiene la posición de esta a menos que se genere un movimiento, una vez se aceleró se observó que la aeronave ascendió de manera estable con sincronismo en los cuatro motores, al dejar de acelerar la aeronave intentaba retener la posición a pesar de las corrientes de aire. Luego de verificar el correcto funcionamiento de los sensores que permiten retener la posición de la aeronave, se procede a generar los movimientos de alabeo, cabeceo y guiñada, ver figura 77.

Durante la prueba se evidenció que la aeronave respondió correctamente a los movimientos efectuados por el piloto generando movimientos hacia adelante y atrás, derecha e izquierda, ascenso y descenso, y movimientos de giro horario y antihorario en una posición fija, logrando un vuelo estable y controlado.

De esta manera se efectuaron más pruebas de vuelo hasta descargar la batería del VANT y una vez el Salva LiPo generó la alerta por descarga de energía se descendió la aeronave y se procedió a generar el respectivo análisis de vuelo de los datos almacenados en el Blackbox.

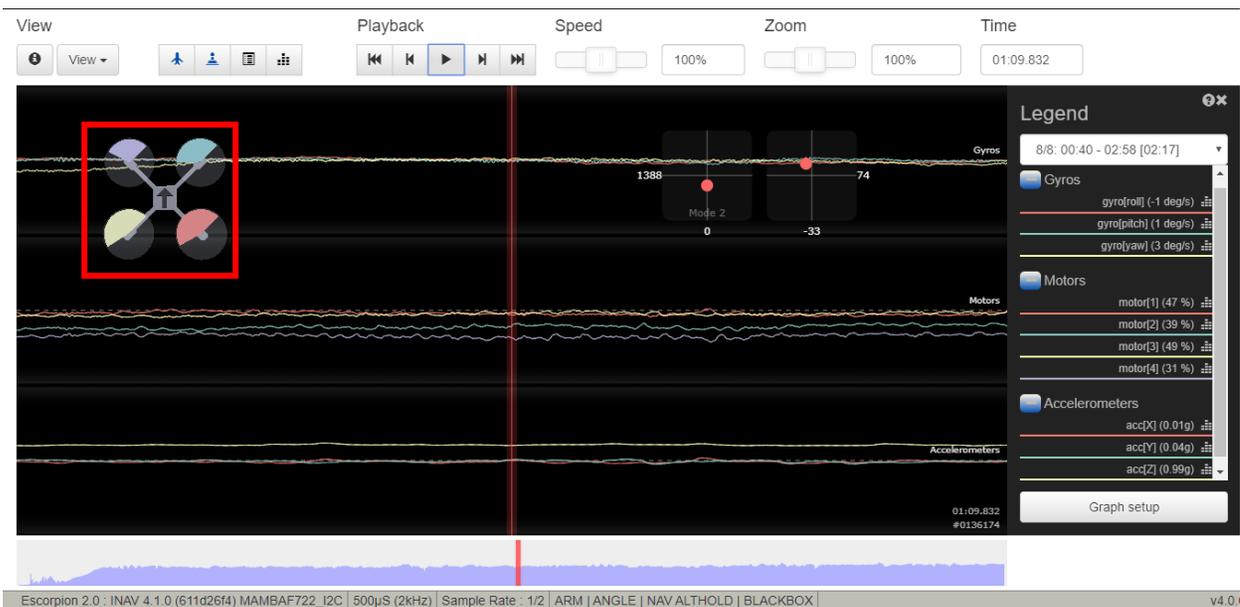


Figura 97. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox fase 2 (fuente propia).

De los datos obtenidos del registro de vuelo se evidenció que los giros en la aeronave se efectuaron de manera controlada, pues no se evidencia saltos en las gráficas de movimiento del giroscopio, en cuanto a la gráfica de los motores se observa como las señales incrementan acorde al incremento de la señal de aceleración, en la figura 97 se observa que la señal de los motores traseros (amarillo y rojo) incrementa a mayor porcentaje que la de los motores delanteros (morado y verde), lo que infiere que se está generando un movimiento hacia adelante, así mismo se evidencia los cambios en la gráfica de las señales de los motores dependiendo de los movimientos generados durante el vuelo corroborando esto con el movimiento del monitor que representa al VANT y la gráfica de las palancas del radio transmisor.

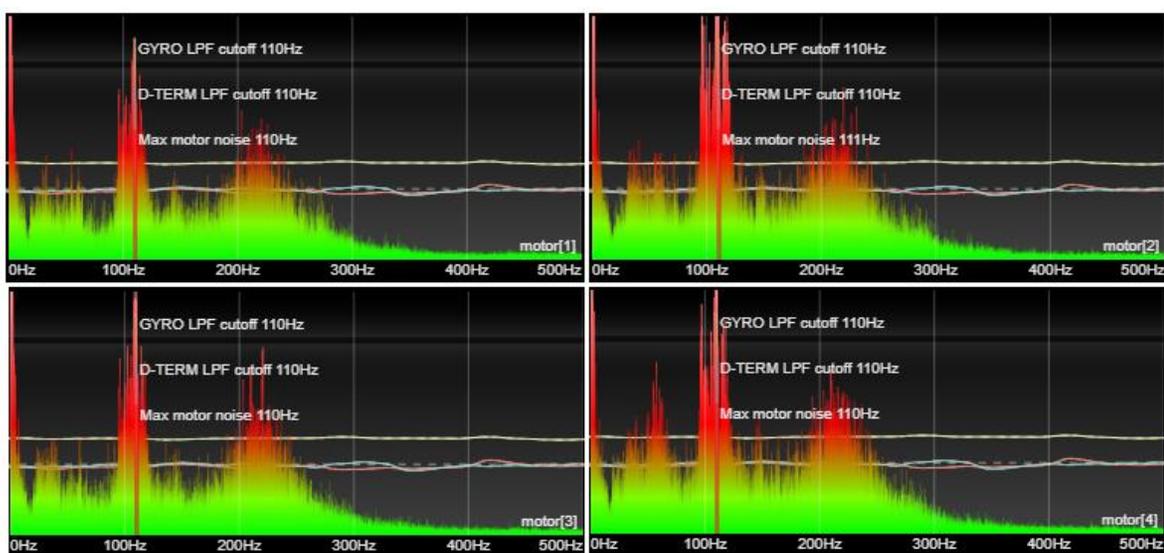


Figura 98. Visualización de las estadísticas de los motores fase 2 (fuente propia).

Respecto al comportamiento de los motores durante la fase 2 de la prueba manual se puede observar en la figura 98 que el comportamiento en los cuatro motores fue muy semejante llegando a tener un pico máximo de ruido electromagnético de 110 Hz, pero en general la gráfica muestra que los motores se comportaron correctamente y respondieron a los cambios de aceleración. Así mismo se puede analizar que el sensor acelerómetro detectó las variaciones de velocidad vertical acc[z], al igual que las variaciones de velocidad cuando se giró la aeronave. En general se concluyó que el VANT Escorpión en este punto de las pruebas de vuelo, es una aeronave completamente controlable y estable como se pudo comprobar.

Para continuar con la fase de pruebas de vuelo programada es necesario que en el VANT todos los sensores de navegación (giroscopio, acelerómetro, barómetro, brújula, magnetómetro, GPS) estén calibrados y funcionando correctamente, en esta fase se corroboró que la aeronave cuenta con navegación segura y se geolocaliza como se puede observar en la figura 99, razón por la cual se procede a continuar con la fase de asociar una ruta a la aeronave por medio de puntos de referencia para que realice un vuelo autónomo bajo la supervisión y control del piloto.

stateFlags	10846987	GPS_FIX_HOME GPS_FIX SMALL_ANGLE COMPASS_CALIBRATED ACCELEROMETER_CALIBRATED AIRMODE_ACTIVE ESC_SENSOR_ACT MULTIROTOR ALT_CONTROL REV_MOTOR_FOR
failsafePhase	0	FAILSAFE_IDLE
rxSignalReceived	1	1
rxFlightChannelsValid	1	1
hwHealthStatus	1365	GYRO OK ACCEL OK COMP OK BARO OK GPS OK RANGE OK
powerSupplyImpedance	84	84
sagCompensatedVBat	1511	15.11V
wind[0]	0	0.00m/s
wind[1]	0	0.00m/s
wind[2]	0	0.00m/s
IMUTemperature	288	28.8°
baroTemperature	214	21.4°

Figura 99. Datos de vuelo de la última prueba manual fase 2 software Blackbox Explorer iNav (fuente propia).

Durante las pruebas de la fase 2 de vuelo manual se realizaron videos como evidencias los cuales se pueden observar en el Anexo 20 y Anexo 21.

6.2.3.2. Prueba de vuelo programada

Tras lograr una sustentación estable de la aeronave en una posición de altura determinada en los modos de vuelo *Poshold* y *Heading Hold*, y después de asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de navegación y transmisión FPV del VANT, se procedió a generar una prueba de vuelo mediante puntos de referencia (WP) la cual se llevó a cabo en la cancha de futbol de ESUFA, lugar ideal por su extensión y carencia de obstáculos. Desde iNav se configuró la misión de vuelo programada definiendo en primer lugar el punto de inicio o “Home” ubicado en la cancha, luego

se definieron 5 WP a lo largo de la cancha y se configuro una velocidad de 25 Km/h y una altura de 9 m para todos los puntos, seguidamente se guardó la misión en la memoria flash de la controladora. Por último, se calibró el barómetro el cual permite detectar los cambios de presión en vuelo y medir la distancia de la aeronave en referencia al suelo, al igual se corroboró en el software que la ubicación del sensor magnetómetro estuviese direccionando correctamente el norte magnético para que la aeronave se dirija.

Para la ejecución de la misión de vuelo de la manera más acorde se enciende la aeronave y se verifica que esté enlazada con el radio transmisor, posteriormente se ubican las palancas sticks del radio control en la posición “load waypoint mission” como evidencia en la figura 98, con el fin de cargar la misión de vuelo desde la cancha lugar donde va a despegar y donde se ubicó el punto Home. Seguidamente se genera una alerta sonora indicando que la aeronave ha cargado la misión de vuelo previamente programada.

Se energiza la aeronave, se arman los motores y se activa el modo “Blackbox” del canal 8 con el fin de almacenar los datos del vuelo programado. El interruptor del canal 6 se ubica en la posición 2, ver tabla 5, y se despega la aeronave de manera estable, una vez se sustenta a una altura deseada se pasa el interruptor a la posición 3 del mismo canal “Nav WP”, de esta manera el VANT Escorpión inició la ruta previamente configurada desde iNav.

Arm		Calibrate Compass	
Disarm		In-flight Calibration Controls	
Profile 1		Trim Acc Left	
Profile 2		Trim Acc Right	
Profile 3		Trim Acc Forwards	
Battery profile 1		Trim Acc Backwards	
Battery profile 2		Save waypoint mission	
Battery profile 3		Load waypoint mission	
Calibrate Gyro		Save Setting	
Calibrate Acc		Enter OSD Menu (CMS)	

Figura 100. Gráfica de las posiciones de los sticks para activación de funciones en la aeronave. MrD (2021).

Gracias al sistema de transmisión de video y a la conexión de telemetría de la aeronave, desde la pantalla FPV se pudo observar en qué modo de vuelo se encontraba, el estado de la misión de vuelo y si se encuentra cargada para poder iniciarla, el tiempo de vuelo, el nivel y porcentaje de carga de la batería, revoluciones de los motores, altura de vuelo, cantidad de satélites recepcionados para la navegación (para el caso del VANT Escorpión la navegación es segura a 17 satélites), adicional a esto se puede observar en que punto de referencia se encuentra y el tiempo que tardaría la aeronave al siguiente punto de referencia, paralelamente a los datos mencionados se observa la transmisión de video que recibe la cámara de la aeronave, como se puede observar en la figura 101.



Figura 101. Transmisión de video FPV prueba de vuelo mediante puntos de referencia (fuente propia).

Durante dicha prueba de vuelo se observó que en el VANT una vez se activa el modo WP inmediatamente procede a generar la ruta nivelándose a la altura programada y recorriendo cada uno de los puntos demarcados y cargados desde iNav, a pesar de las corrientes de viento presentes a la hora de la prueba, se observó que la aeronave en todo momento mantuvo la posición gracias a detección de cambios de presión y su posterior corrección PID, una vez la aeronave llega al último punto de referencia, se configuro que retornara al punto Home, es por esto que la aeronave se dirigió a la posición demarcada y luego de unos segundos descendió de manera controlada desacelerando los motores y una vez llegó al suelo cayó completamente las revoluciones.

Luego de la realización satisfactoria de la prueba de vuelo mediante puntos de referencia se procedió a analizar y validar los datos de vuelo almacenados en la caja negra gracias a la herramienta Blackbox Explorer iNav.

Se pudo analizar toda la trazabilidad de datos desde el momento que se armaron los motores hasta el momento que se apagaron, de los datos de vuelo almacenados se pudo analizar que antes de activarse el modo WP, la aeronave tuvo un correcto comportamiento de vuelo como se puede evidenciar en la figura 102, la gráfica del giroscopio muestra que para ese momento no se generó ningún movimiento de la aeronave y esta solo se sustentó acelerada en dirección vertical como se aprecia en la señal del acelerómetro azz (Z) y en las posiciones de las palancas del radio control, así mismo se observa en la gráfico que representa el vuelo del VANT que los motores delanteros y traseros giran en simetría porcentual.

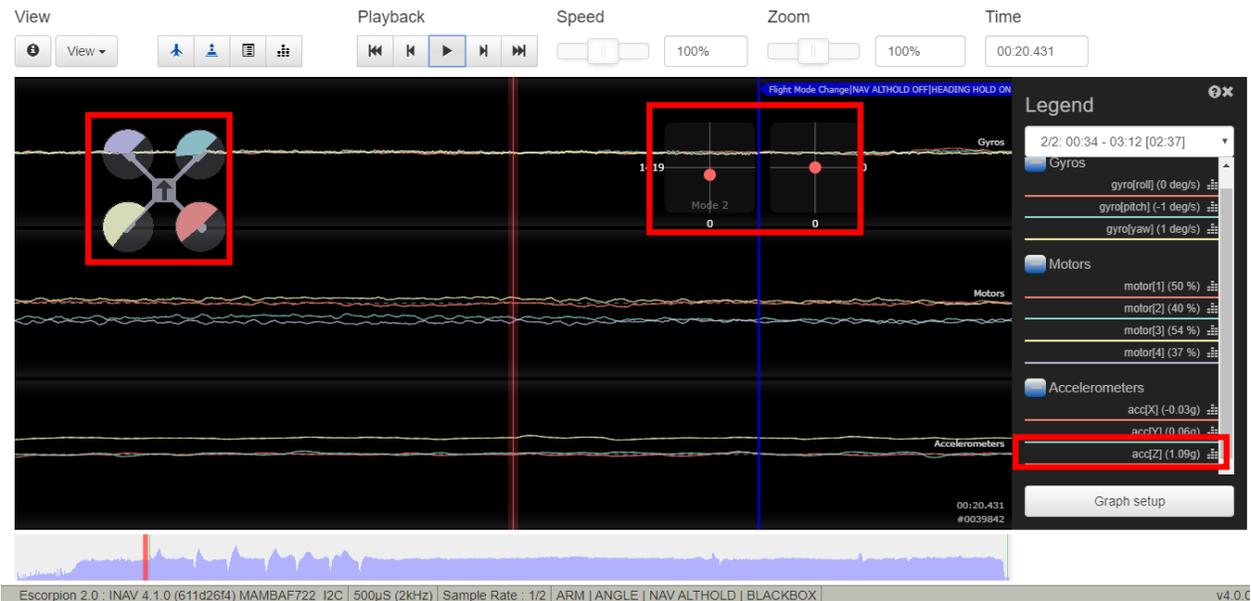


Figura 102. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP (fuente propia).

Una vez que se activó el modo de vuelo WP se observó gráficamente que la aeronave inmediatamente se aceleró y generó un movimiento de cabeceo que dirigió la aeronave hacia adelante mientras generaba un alabeo a la izquierda según la señal gyro(roll) y las gráficas de las palancas, con el fin de buscar el primer punto de referencia, véase la gráfica en la figura 102.

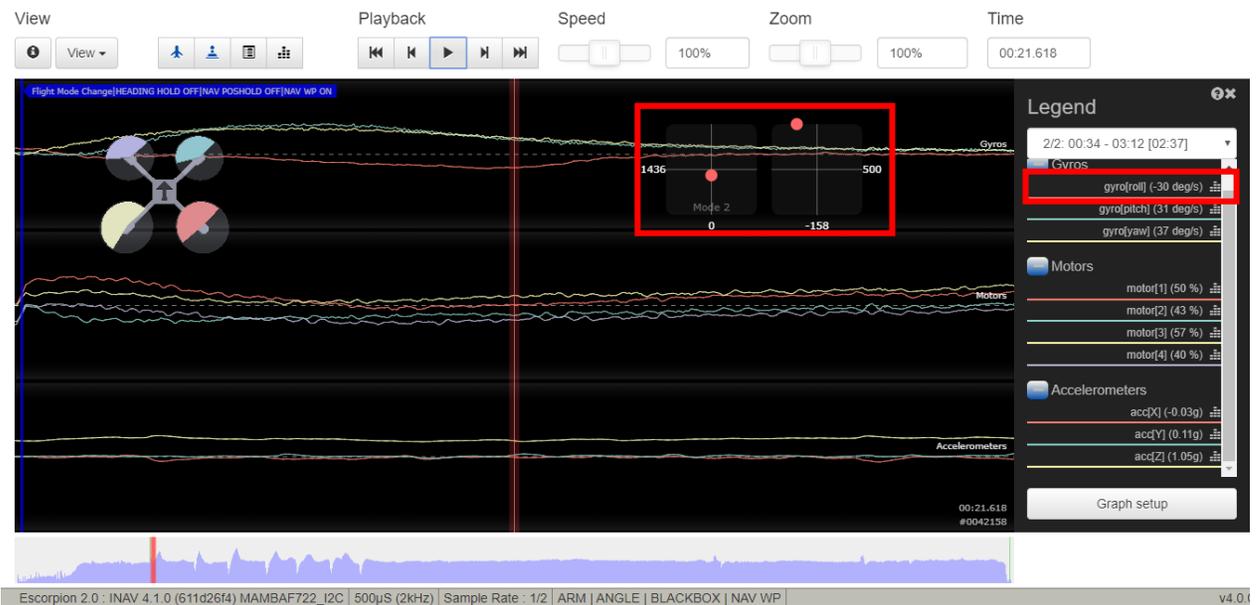


Figura 103. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP (fuente propia).

Antes de llegar al primer punto de referencia se observa gráficamente en la figura 103, como la aeronave desaceleró los 4 motores y en la gráfica del acelerómetro se comprueba como cae la señal, paralelo a esto se elevó el frente de la aeronave, seguidamente niveló el movimiento de cabeceo, hizo un movimiento de alabeo a la derecha y aceleró nuevamente para continuar el rumbo al segundo punto de referencia.

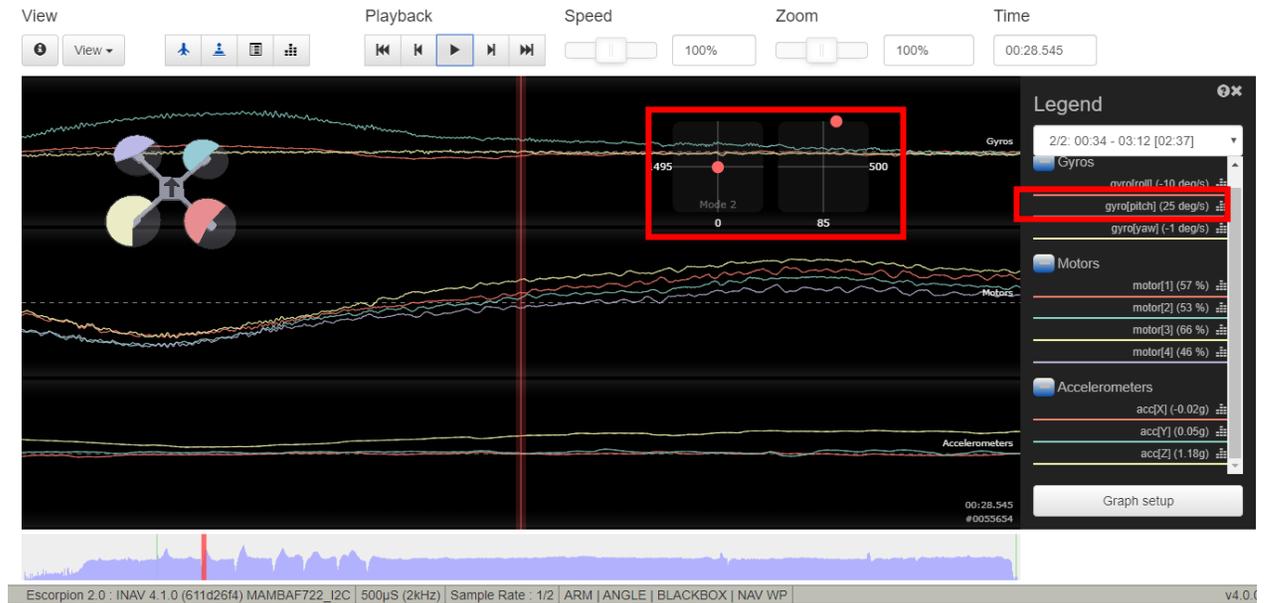


Figura 104. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP (fuente propia).

De manera paralela a lo largo de la prueba de vuelo se observó gráficamente como la aeronave desaceleró sus motores y se direccionó para poder seguir la ruta para llegar al siguiente punto de referencia y una vez consiguió completar la ruta hasta el sexto punto, la aeronave direccionó su rumbo hasta el punto de retorno a casa el cual se ubicó muy cerca de donde se armaron los motores. Una vez llegó a dicho punto la aeronave se sustentó por cierto lapso de tiempo mientras se direccionaba el norte apuntando hacia el punto Home, nivelando el vuelo y una vez la aeronave comprobó que era seguro el descenso, lo precedió hacer de manera controlada como se observa gráficamente en la figura 105 desacelerando los motores hasta que una vez se sostiene en tierra firme desarma los motores.



Figura 105. Registro de los datos de vuelo almacenados en la Blackbox prueba WP (fuente propia).

De la gráfica de las estadísticas de los cuatro motores se puede analizar que el promedio de ruido máximo rondó los 111 Hz, se observa simetría en el comportamiento de los cuatro motores además se puede ver a lo largo del periodo de tiempo de la prueba en qué momento los motores generaron el mayor esfuerzo, como se puede ver en la figura 106.

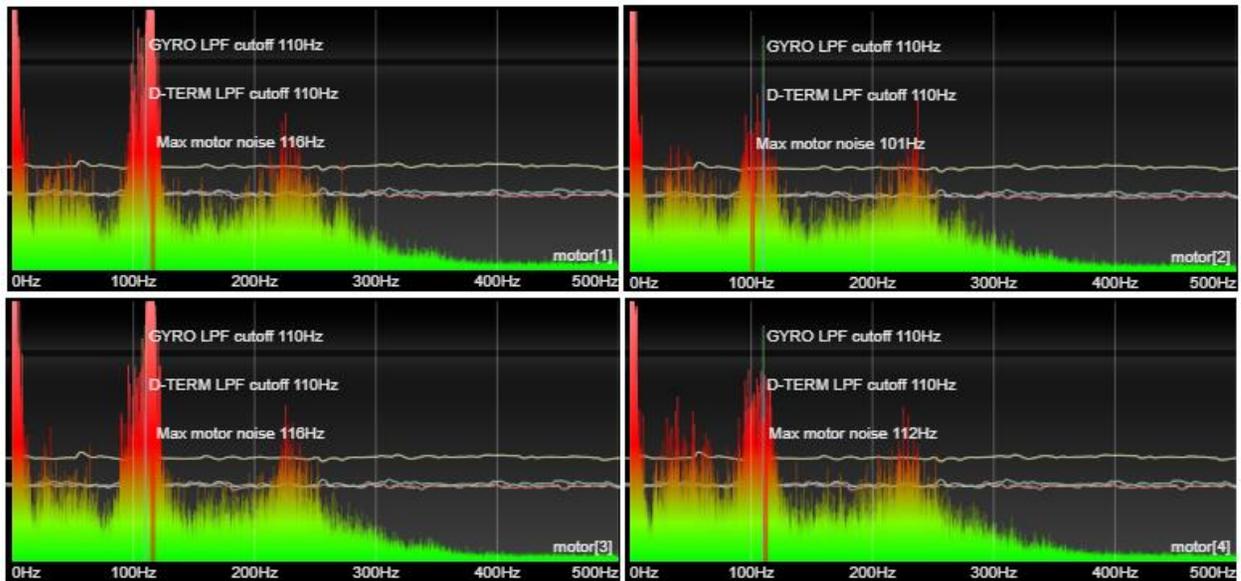


Figura 106. Visualización de las estadísticas de los motores prueba WP (fuente propia).

Una vez realizada y analizada la prueba de vuelo por medio de puntos de referencias de manera exitosa se procedió a generar diferentes pruebas de vuelo cambiando la velocidad de vuelo, el

número de puntos de referencias (WP) y la altura de vuelo, cada una de las pruebas desarrolladas posteriormente se llevaron a cabo con éxito, dando así por terminado el proyecto del diseño y elaboración de un vehículo aéreo no tripulado con fines de monitoreo y quedando listo para hacer entrega al comandante del Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica, así mismo llegando a ser la base para futuros proyectos dentro de la entidad.

Durante las pruebas de la fase de vuelo mediante puntos de referencia (WP) se realizaron videos como evidencias los cuales se pueden observar en el Anexo 22, Anexo 23 y Anexo 24.

6.3. Impacto socio-económico

El uso de vehículos aéreos no tripulados es cada vez más común en múltiples espacios. En este caso, el proyecto se situó en las instalaciones de la Escuela de Suboficiales Fuerza Aérea (ESUFA) y tuvo un impacto socio-económico alto debido a que buscó mejorar el proceso de vigilancia mediante la fabricación e implementación de un VANT para el monitoreo de sus instalaciones y sus alrededores, beneficiando directamente a toda la institución y a la comunidad aledaña del municipio de Madrid, Cundinamarca. La Fuerza Aérea Colombiana es una de las tres instituciones de las Fuerzas Militares de Colombia, encargada de acuerdo con la Constitución de 1991, de la labor de ejercer y mantener el dominio del espacio aéreo colombiano para defender la soberanía, integridad territorial y el orden constitucional; y este proyecto cumple con la misionalidad de la institución.

Actualmente el mercado de VANT se está desarrollando muy rápidamente gracias a los diferentes usos que se le han dado a este tipo de aeronaves expuestos a lo largo del presente informe y a la demanda en general del mercado es que se ha propiciado su incremento de precio, por lo que uno de los principales objetivos de este proyecto se efectuó de manera asertiva ya que el costo de fabricación se redujo en comparación a uno comercial semejante en prestaciones, lo que benefició y motivó el uso de estas aeronaves en múltiples áreas dentro de la Entidad, como es el caso de la solicitud al CETIA de la fabricación de 10 aeronaves para entrenamiento del curso de pilotos de drones desarrollado en la base aérea de Cacom 3 (Barranquilla), trayendo consigo un ingreso económico para la entidad.

Así mismo se puede extrapolar la implementación de esta aeronave a las empresas colombianas dedicadas al sector de la vigilancia, este avance tecnológico puede convertirse en una herramienta de trabajo que tiene el potencial de fortalecer los procesos de vigilancia y control de la seguridad. Los vehículos aéreos no tripulados utilizados para vigilancia tienen muchas ventajas, que incluye la visualización de mayor nivel, la percepción de la distribución de las personas en espacios amplios y los efectos de disuasión en algunos casos específicos. Los sectores en donde los servicios de vigilancia y seguridad privada son más necesarios y que pueden beneficiarse de la tecnología de drones son las instituciones públicas, bancos, la industria y las empresas del sector comercial.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Recomendaciones

Antes de realizar un vuelo sea manual o programado, siempre es necesario realizar un chequeo de prevuelo el cual garantizará la seguridad e integridad tanto de la aeronave como de terceros, verificando el entorno y espacio aéreo donde se va a pilotar, al igual que el estado físico de la aeronave y el radio control.

Relacionado con el uso, es indispensable que cada vez que se vaya a realizar un vuelo automático se genere una correcta calibración de la brújula o barómetro de la aeronave ya que dicho sensor es susceptible a cambios por factores externos como el viento o la luz, así mismo guardar correctamente la misión de vuelo y siempre cargarla mediante el radio transmisor antes de armar los motores.

En lo posible permitir que una persona idónea en pilotaje de aeronaves no tripuladas sea quien maniobre el VANT o en su defecto generar una capacitación previa no solo en la parte técnica de pilotar sino en cuanto al marco legal-normativo para la operación de estas aeronaves en el espacio aéreo colombiano.

7.2. Conclusiones

En el presente trabajo de grado desarrollado en modalidad de monografía, se ha planteado e implementado un sistema electrónico que cumple con los requerimientos necesarios para telemetría, navegación y control de un VANT de tipo cuadricóptero denominado Escorpión, con el fin de monitoreo y vigilancia en la ESUFA. El macroproyecto se logró llevar a satisfacción gracias al trabajo interdisciplinar de dos compañeros de Ing. Aeronáutica de las Universidades San Buenaventura y Los Libertadores, e investigadores y expertos de la Fuerza Aérea Colombiana quienes diseñaron y fabricaron el sistema estructural en material Onyx y ajustaron la aerodinámica de la aeronave.

Para cumplir los objetivos del proyecto fue fundamental una investigación exhaustiva del marco conceptual acerca de las generalidades y los sistemas que componen un VANT con el fin de contextualizar el proyecto en un escenario actual. Así mismo indagar sobre los proyectos implementados a nivel mundial y local con respecto a la vigilancia y monitoreo con vehículos aéreos no tripulados, de esta manera se generó las bases para iniciar las fases metodológicas del proyecto, las cuales se establecieron de manera generalizada con el paso a paso de este proyecto con el fin de generar una guía en el caso de querer implementar uno similar dentro de la misma entidad o extrapolar su implementación.

Así mismo se seleccionaron los dispositivos acordes para la implementación de los sistemas que componen la aeronave, descritos en el presente documento. Tras pruebas de rpm y potencia de

motores en el banco de la marca “Racerstar” se logró comparar la eficiencia de cuatro rotores y el empuje generado por cuatro tipos de hélices. Seleccionando de esta manera el motor Emax RS2205 2300kv y la hélice tripala T4943. De la prueba de selección del rotor se evidenció que el motor Emax RS2205 2300kv presentó el mejor comportamiento en las pruebas realizadas, en cuanto a eficiencia el motor presenta la mejor regularidad en la curva de datos pues después del 60% de velocidad la tendencia de datos esta superior a la de los demás datos de motores obtenido una eficiencia de 2.829 g/W al 100% de velocidad. Al ser un motor eficiente el consumo de corriente es bajo y se comprobó, pues la tendencia de datos de este motor en esta prueba estuvo por debajo del consumo de corriente de los demás motores a lo largo de la grafica llegando a un pico máximo de 23,2 A al 100% de velocidad. Así mismo se concluye que los motores que más consumen corriente son aquellos que generan más empuje a pesar de esto se analiza que el motor RS2205 tiene una gráfica creciente respecto a porcentaje de velocidad obtenido un máximo empuje de 1103 g, de acuerdo a la necesidad del VANT de levantar hasta 2 Kg es más que suficiente para suplir dicha tarea y por temas de optimizar el consumo y autonomía de carga se seleccionó dicho motor.

Tras la prueba de selección de las hélices se analizó que a mayor consumo de corriente se genera mayor empuje, a pesar de eso se puede evidenciar que la hélice T4943 en un 75% de recorrido del acelerador genera poca más de 500 g al igual que la hélice F5 5.1”. De acuerdo a la necesidad del VANT para generar un empuje de 500g por motor y optimizar el consumo de energía, se opta por implementar el uso de la tripala T4943 ya que en las pruebas es la que menos consumo de corriente genera en el motor con un pico máximo de 15,9 A al 75% de velocidad y adicional genera un empuje de 501 g por motor, suficiente para generar la sustentación del peso máximo a levantar en el VANT.

Mediante el software iNav se logró configurar y ajustar los sistemas de a bordo de la aeronave con el fin generar el control de los rotores, vuelos manuales con ajuste de altura, la aeronavegabilidad, la trazabilidad de una ruta y vuelo autónomo, y la transmisión de video en primera persona de la aeronave Escorpión, con el fin de desarrollar un sistema que se integrara al frame final desarrollado por los compañeros de la disciplina aeronáutica. Así mismo se configuró de manera satisfactoria el enlace del radio transmisor con el receptor de la aeronave para generar vuelos manuales.

Por último, se comprobó el funcionamiento de todos los sistemas que componen al VANT mediante ensayos prácticos obteniendo que la aeronave puede ser pilotada de manera manual a través del radio transmisor mediante el modo de vuelo Poshold o Althold, y esta mantendrá su altura, lo cual es esencial a la hora de generar captura de imagen. Además, se comprobó el correcto comportamiento de la aeronave a la hora de generar una misión de vuelo programada, llegando a geolocalizarse y generar una trayectoria de manera correcta gracias a la calibración del acelerómetro y el barómetro, todo esto acompañado de la transmisión de video en primera persona en donde el piloto tiene visualización del recorrido de la aeronave a lo largo de los puntos de ruta trazados e información adicional del estado de la misma.

Así, finalmente el VANT Escorpión es una aeronave funcional con la capacidad de generar un monitoreo programado a lo largo del área que comprende la ESUFA de manera personalizable en cuanto al área de cobertura, velocidades y alturas de recorrido de way points. En un marco general, dicho proyecto ha contribuido a robustecer y simplificar el proceso de monitoreo de vigilancia para

la ESUFA optimizando el tiempo empleado y simplificando la cantidad de personal para dicho fin, así como simplificar el costo de adquisición de tecnologías como esta pues el costo de materiales es de alrededor de \$3.200.000 que comparada con una aeronave semejante en prestaciones puede rondar los \$6.000.000. Además de esto al ser una aeronave fabricada en un software libre será completamente personalizable y compatible con aeropartes genéricas.

Es por esto que una vez se dio por finalizada la fase de pruebas y se concluyó que los objetivos del proyecto se completaron de manera satisfactoria, se hizo entrega de la aeronave al comandante del CETIA el señor TC. Richard Humberto Cáceres León quien luego de verificar el funcionamiento de esta y generar sus apreciaciones afirmando que el VANT se encontraba listo para darse entrega al comandante de la ESUFA para pruebas y su posterior implementación, felicitó al grupo de trabajo y generó reconocimientos por el trabajo realizado.

El VANT Escorpión es adaptable a mejoras futuras en cuanto a su autonomía de carga, ampliación del rango de cobertura mediante vuelo manual, optimización del sistema de almacenamiento de vuelo pues la tarjeta actual es limitada en almacenamiento, creación de un sistema de almacenamiento de video, inteligencia artificial para reconocimiento de formas y demás necesidades según su finalidad de uso.

8. Referencias

- ¿Cuáles son las partes de un dron? (2018). Obtenido de <https://dronprofesional.com/blog/cuales-son-las-partes-de-un-dron/>
- AIRK Drones explica para qué sirven los Modos de vuelo.* (2017). Comunicae.es . Recuperado a partir de <https://www.comunicae.es/nota/airk-drones-explica-para-que-sirven-los-modos-1192224/>
- Automatizados, S. I., & Bueno, D. (n.d.). *Motor eléctrico brushless: Funcionamiento y características* (pp. 1–7). <https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf>
- AVISO Y RESPUESTA QUEJA FAC.* (2021). Combate Aereo de Combate No 5. [https://cdn979857.fac.mil.co/sites/default/files/2021-11/AVISO Y RESPUESTA QUEJA FAC-E-2021-000158-WA.PDF](https://cdn979857.fac.mil.co/sites/default/files/2021-11/AVISO_Y_RESPUESTA_QUEJA_FAC-E-2021-000158-WA.PDF)
- Baterías de Drones.* (2020). Obtenido de <https://www.controldron.com/baterias-de-drones-2/>
- Bhardwaj, Anshuman & Sam, Lydia & Akanksha, & Martín-Torres, F. J. & Kumar, Rajesh. (2016). *UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. Remote Sensing of Environment.* 175. 196-204. 10.1016/j.rse.2015.12.029.
- CIAIAC.* (2011). Informe anual 2011. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/pdf/5C791270-B1D5-4DCF-A725-775D5C368F2B/112545/Informe_anual_2011.pdf
- Dron DJI WIND 2 es operado por su Fuerza Aérea Colombiana.* (2021). Fuerza Aerea Colombiana. Recuperado desde <https://www.fac.mil.co/es/noticias/dron-dji-wind-2-es-operado-por-su-fuerza-aerea-colombiana>.

Drones para uso civil: una tecnología de doble filo. (2013). BBC News Mundo. Recuperado a partir de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/02/130212_eeuu_drones_civil_comercial_regulacion_wbm

Dynamo Electronics. (2019). *Baterías Li-Po.*
http://www.dynamoelectronics.com/descargas/Baterias_Lipo.pdf

Firmware para un dron. (2019). Obtenido de <https://www.prometec.net/firmware-para-un-dron/>

Fuerza Aérea recibe drones para la seguridad y atención de desastres. (2016). Fuerza Aerea Colombiana. Recuperado desde <https://www.fac.mil.co/en/node/37374>

Hemav. [The Drone Community by Hemav]. (2018, 21 de noviembre). *¿Qué dron me compro? (Tipos de drones)* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=GItoP4qR06U>.

Hoffmann, M. (2020). *Guía de modos INAV. Grupo de Ala Fija Inav.* Recuperado desde <https://inavfixedwinggroup.com/>

Lorenzo, S. F. (2020). *Trabajo Fin de Grado Acceso a datos internos de telemetría del dron MKQuad MikroKopter para su uso en aplicaciones avanzadas.* ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN.

Parametrización del plan de vuelo de drones. (2019). Gis&Beers. Recuperado desde <http://www.gisandbeers.com/planificacion-del-plan-de-vuelo-drones/>

Patrullajes y perifoneo aéreo con drones, aportan mayor seguridad en el Amazonas. (2021). Fuerza Aerea Colombiana. Recuperado desde <https://www.fac.mil.co/es/noticias/patrullajes-y-perifoneo-aereo-con-drones-aportan-mayor-seguridad-en-el-amazonas>

PINILLA, L. (2019). *Drones militares 'made in Colombia' para reemplazar a los extranjeros*. El Tiempo. Recuperado a partir de <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/drones-para-uso-militar-en-colombia-350998>

RadioMaster RC TX16S V1.0 Manual del usuario. (2021). Obtenido de <https://manuals.plus/es/radiomaster/tx16s-manual-pdf#axzz7eVFCX8SX>

Rodríguez, A. (2020). *Tipos de drones y sus características*. Recuperado a partir de <https://iberfdrone.es/tipos-drones-y-caracteristicas/>

Rodríguez, A. *Los mejores motores de drones y cómo funcionan los motores de drones, ESCs, sistemas de propulsión*. Obtenido de <https://guiadrones.com/base-de-conocimiento/como-funcionan-los-motores-de-drones/>

Rushby, R. S. (2017). *Drones armados y el uso de fuerza letal: nuevas tecnologías y retos conocidos*. CES Derecho, 22–47. <https://doi.org/10.21615/cesder.8.1.2>

Sánchez, C. (2017). *VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS: DESCRIPCIONES GENERALES Y APLICACIONES*. 1, 2017.

TF-Luna 8m low cost distance sensor. (2022). Retrieved from <http://en.benewake.com/product/detail/5e1c1fd04d839408076b6255.html>

Santana Cruz, Ernesto Emmanuel. (2017). “*Propuesta de Sistema Multi-UAV Para Aplicaciones de Cobertura de Área*.” 154.

Jimenez, E. (2019) *Uso de drones como herramienta para la video vigilancia y seguridad de los oleoductos en el departamento de Arauca*.

<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/35048>

- Velazquez, M. (2019) La Seguridad y la Defensa en la cuarta Revolución Industrial. Revista ensayos militares. 5(2), 83-97.
<https://revistaensayosmilitares.cl/index.php/acague/article/view/36/28>
- Lugo, P y Cifuentes, A. (2021) Propuesta de mejoramiento de la seguridad mediante drones en la ciudad de bogotá (project selantrophus). CreativeCommons. 9(17), 105-115.
<https://urepublicana.edu.co/ojs/index.php/ingenieria/article/view/795/597>
- Fernández, J. C. (2013). DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN CUADRICÓPTERO. 241.
- Patiño, L. A., Osorio, J. A., & Torres, J. A. (2015). Diseño de un sistema de control de vuelo para un dron. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 14(27), 143-151.
- Lazcano, A., Padierna, L. C., Bustos, I., Gómez, L. V., & Mares, R. J. (2019). Quadcopter Design and Control in Autonomous Flight for Visual Inspection of Industrial Infrastructure. In 2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC) (pp. 1-6).
- Salazar, L. (2020, February 20). Nuevos Sistemas de Navegación para drones en Entornos Sin GPS. Retrieved from <https://a21.com.mx/un-espacio-para-los-no-tripulados/2020/02/20/nuevos-sistemas-de-navegacion-para-drones-en-entornos>
- Ariza, R. A., Bernal, L. F., Londoño, J. A., & Jaramillo, O. A. (2018). Sistema de Navegación Autónoma de UAV basado en Odometría Visual y Fusión de Sensores. Ingeniería y Competitividad, 20(2), 135-146.
- Mora, J. C., Rojas, A., & Rodríguez, F. A. (2019). Sistema de navegación visual para drones utilizando imágenes estereoscópicas. Ingenius, (22), 23-30.

Fernández, Juan Carmona. 2015. "DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN CUADRICÓPTERO." 241.

Saltos, Alvaro. 2015. "Desarrollo de Un Sistema de SLAM Para El Robot AR . Drone En Entorno ROS ."

D. Mototolea, "A Study On The Actual And Upcoming Drone Communication Systems," 2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISSCS.2019.8801800.

Rosero, L. A., & Betancourt, J. A. (2020). Diseño e implementación de un sistema de telemetría para el control de un cuadricóptero. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(36), 129-142. doi: 10.22395/rium.v19n36a7

Velazquez, M., Seebach, S y Torrejon, P. (2019) Drones y epidemiología: la tecnologización de la vigilancia. *Estud. atacam.* 62. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-10432019005001002&script=sci_arttext

Chavez, J y Duarte, E.(2016) Uso de drones para servicios. <http://www.laccei.org/LACCEI2016-SanJose/StudentPapers/SP15.pdf>

Saumeth, E. (2021). *La Fuerza Aérea Colombiana recibirá el UAV Quimbaya antes de fin de año.* [Imagen]: Recuperado a partir de <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3220001/uav-quimbaya-ad-portas-entregado-fuerza-aerea-colombiana>.

Szabolcsi, R. (2016). *UAV OPERATOR TRAINING – BEYOND MINIMUM STANDARDS. SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATION IN THE AIR FORCE*, 18, 193–198. <https://doi.org/10.19062/2247-3173.2016.18.1.25>

- Últimas tendencias en el uso de drones para transporte. (2021). Aerocamaras Especialistas en Drones. Recuperado a partir de <https://aerocamaras.es/tendencias-en-uso-de-drones-para-transporte/>
- Valero, C. (2022). *Todos los tipos de drones según el uso, diseño o control. Zona ADSL* . Recuperado desde <https://www.adslzone.net/reportajes/drones/tipos-drones/>
- Visioli, A., & Practical, P. I. D. (2006). *Control. Advances in Industrial Control*.
- Yara Doamo, C. (2017). *La Geomática y los drones de ala fija : documentación arqueológica del área de Mleiha (E . A . U)*.
- Aeronáutica Civil. (2018). *Operación De Sistemas De Aeronaves No Tripuladas - Uas*. 1, 37. [http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/Resoluciones TA 2018/RESL. N° 04201 DIC 27 de 2018.pdf](http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/Resoluciones%20TA%202018/RESL.%20N%C2%BA%2004201%20DIC%2027%20de%202018.pdf)
- Aeronáutica civil de Colombia. (2015). *Circular reglamentaria (Numeral 4.25.8.2) Principio de Procedencia 5100-082 Versión: 01 Fecha: 27/07/2015* Pág: 1 de 34. 34. [http://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/certificacion-y-licenciamiento/Documents/PROYECTO BORRADOR CIRCULAR RPAS.pdf](http://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/certificacion-y-licenciamiento/Documents/PROYECTO%20BORRADOR%20CIRCULAR%20RPAS.pdf)
- Reglamentación. (2022). Obtenido de <https://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/sistema-%20de-aeronaves-pilotadas-a-distancia-rpas-drones/Paginas/Reglamentacion.aspx>.
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2021). *Reglas Generales De Vuelo Y De Operación*. Rac 91, 449. <http://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/reglamentacion/rac>

Diatone Mamba Stack - APP (WiFi) F722 MK1 FC. Obtenido de

<https://www.getfpv.com/diatone-mamba-stack-app-wifi-f722-mk1-fc-f50-50a-blheli-32-esc.html>

FlySky, R. (2016). *Digital Proportional Radio Control System* (pp. 12–13). Fly Sky.

<https://www.flysky-cn.com/s/FS-i6S-User-manual-20170706-compressed.zip>

Módulo GPS NEO-M8N. (2022). Obtenido de <https://www.onedrone.com/store/neo-m8n-gps-module-with-protective-shell-for-apm-px4-pixhawk.html>

Corporation, QST. 2016. “*Axis Magnetic Sensor QMC5883L.*” *QST Corporation, Shanghai* 1–19. *ElectroPro*. n.d. “*Www.Electropro.Pe.*” 51(073).

Spychalski, P. (2022). INAV. Obtenido de <https://github.com/iNavFlight/inav/wiki>

Comandos de iNav Stick: para todos los modos de transmisor. (2021). Obtenido de

<https://www.mrd-rc.com/tutorials-tools-and-testing/inav-flight/inav-stick-commands-for-all-transmitter-modes/>

Spychalski, P. (2022). *INavFlight/blackbox-log-viewer: Interactive log viewer for flight logs recorded with BlackboxPaweł Spychalski*. Retrieved from

<https://github.com/iNavFlight/blackbox-log-viewer>

9. Anexos

Anexo 1 – Calibración del sensor acelerómetro

<https://drive.google.com/file/d/1Opi4K9-5ElzQ2EgO9x-JFjCj4U2PTiiH/view?usp=sharing>

Anexo 2 – Calibración del sensor barómetro

<https://drive.google.com/file/d/1kLwFNG4Yf7JhXA1DN9lmZKY6Sx6eqIzC/view?usp=sharing>

Anexo 3 – Comprobación de sentido de giro y funcionamiento de los motores

https://drive.google.com/file/d/1UqdOphAGkJPkHXaMcG9K1_KXXLtWkTMO/view?usp=sharing

Anexo 4 – Comprobación del enlace entre el radio control y la aeronave

https://drive.google.com/file/d/1pXVLzgn5ASD1wuTkd8Rcg_VUYHChqt-o/view?usp=sharing

Anexo 5 – Explicación y validación del funcionamiento de los interruptores y asignación de canales de transmisión

https://drive.google.com/file/d/1iJibIdk-JTTiE-aJ14QEZ_3JvU-gIWJd/view?usp=sharing

Anexo 6 – Configuración de los puntos de referencia para una misión de vuelo

<https://drive.google.com/file/d/11XElfCkgYiuOINQH8GlcEsFORX1MkXEw/view?usp=sharing>

Anexo 7 – Funcionamiento de la visualización por pantalla

<https://drive.google.com/file/d/1i11YzBe3l8R3PM7KeVFG6AGs9ZgRp6Rb/view?usp=sharing>

Anexo 8 – Comprobación del funcionamiento de los sensores a bordo del VANT

<https://drive.google.com/file/d/1TU00aJRJ7M6Fc4lrBb7pwXjpnemMc0jW/view?usp=sharing>

Anexo 9 – Copia de la configuración final del VANT Escorpión

<https://drive.google.com/file/d/1IMJm050tomOc1cvDv9ztoQH-doELXVNi/view?usp=sharing>

Anexo 10 – Calibración del radio control

https://drive.google.com/file/d/1FZMiKel80iRJJ8H_RI7d7As89T4Ju_xp/view?usp=sharing

Anexo 11 – Enlace receptor-transmisor

<https://drive.google.com/file/d/1meA2TaWBof9HWnmTjYoqAGIyiUBr7WeG/view?usp=sharing>

Anexo 12 – Montaje final del VANT Escorpión

https://drive.google.com/file/d/1M7_6XYbh4hWTv9pp--4rnrzJW-IM1-e4/view?usp=sharing

Anexo 13 – Prueba de empuje de una de las hélices con ayuda del banco de motores Racerstar

https://drive.google.com/file/d/1eG_eZ4Jz4DfIJ67W-oJJWQEgeJMkG3kI/view?usp=sharing

Anexo 14 – Datos de la prueba Manual de vuelo Fase 1

<https://drive.google.com/file/d/1HApdEjbiJEXDbHWiF0iW6tmVmz2ViMXJ/view?usp=sharing>

Anexo 15 – Datos de la prueba Manual de vuelo 2 Fase 1

https://drive.google.com/file/d/1u7L4ZfTZZGxS68G_x2fNwm3xkjCknrkV/view?usp=sharing

Anexo 16 – Datos de la prueba Manual de vuelo Fase 2

<https://drive.google.com/file/d/19pQjb96eSMdxRwhaUqBgxw35iU6RdLVk/view?usp=sharing>

Anexo 17 – Datos de la prueba programada mediante WP

<https://drive.google.com/file/d/1EyLo3OKF943H5v4QEXH8qr7vUCV4CKC8/view?usp=sharing>

Anexo 18 – Video prueba Manual de vuelo Fase 1

https://drive.google.com/file/d/1GKJaf_eECLF4wrMVHTwsYNuy851fNGvV/view?usp=sharing

Anexo 19 – Video prueba Manual de vuelo 2 Fase 1

<https://drive.google.com/file/d/1HpSloe3cJ8dNa7oLBgege7hTRH6eAOLX/view?usp=sharing>

Anexo 20 – Video de la prueba Manual de vuelo Fase 2

<https://drive.google.com/file/d/11VjrPGHlbwxkmkiixgYP7Xh9DACbqXIG/view?usp=sharing>

Anexo 21 – Video de la prueba Manual de vuelo Fase 2

<https://drive.google.com/file/d/1NHeS-DaTEF9XpKDsmIskS1hHwGQ2Hh8F/view?usp=sharing>

Anexo 22 – Prueba de la fase de vuelo programada mediante puntos de referencia (WP) 1

<https://drive.google.com/file/d/1JKX6X-Dp-vubGF-8el4oyujurEhWpIiO/view?usp=sharing>

Anexo 23 – Prueba de la fase de vuelo programada mediante puntos de referencia (WP) 2

<https://drive.google.com/file/d/1iYUsxgPhxZsXtHku8ECn21LLc2RnG7Ic/view?usp=sharing>

Anexo 24 – Prueba de la fase de vuelo programada mediante puntos de referencia (WP) 3

https://drive.google.com/file/d/1IfT_mTiyE4n-gHb_q-lgUbT6pUD0SgJv/view?usp=sharing