



**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DE VUELO Y
ESTACIÓN EN TIERRA PARA UN UAV DE ALA FIJA**

Proyecto de Grado

Programa de Ingeniería electrónica Universidad de los Andes

Autor:

Yesid Camilo Almanza Gamba

Profesora Asesora:
Alba Ávila Bernal

Junio 2024

Índice

1 Abstract	4
2 Agradecimientos	5
3 Introducción	6
4 Estado del Arte	7
5 Planteamiento del problema	8
6 Planteamiento del problema	9
7 Objetivos	10
7.1 Objetivo General	10
7.2 Objetivos Específicos	10
8 Marco teórico	11
8.1 UAV	12
8.1.1 UAV de ala fija	12
8.2 Ground Control Station (GCS):	12
8.2.1 Interfaz de la GCS:	12
8.2.2 Operador del UAV:	12
8.3 Controlador de Vuelo	13
8.4 Ejes iniciales del avión	14
8.4.1 Yaw o eje vertical:	14
8.4.2 Pitch o eje transversal:	14
8.4.3 Roll o eje longitudinal:	14
8.5 Main control unit (MCU)	14
8.6 Unidad de Medida Inercial (IMU)	15
8.7 Superficies de control	15
8.8 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	15
8.9 Indicadores de vuelo	15
8.10 Normativa seguida en el desarrollo del proyecto	16
9 Metodología	17
10 Diagrama Funcional	18
11 Interfaz	19
11.1 Mapa de Posición en Tiempo Real	19
11.2 Indicadores de Vuelo:	19
11.3 Modelo 3D del UAV:	20
11.3.1 Gráficas en Tiempo Real:	21
12 Costos del Sistema	22
13 Conclusiones	23
14 Trabajos Futuros	23
15 Anexos	24

Índice de figuras

1	Sistema aéreo no tripulado (UAS)	11
2	Dron de ala fija MQ-9 Reaper Hunter [9]	12
3	Controladores de Vuelo [11]	13
4	Movimientos Inerciales de un UAV: Yaw, Pitch, Roll	14
5	Superficies de control en una aeronave	15
6	Diagrama Metodología Implementada	17
7	Diagrama de bloques del Controlador de Vuelo para UAV de ala fija	18
8	Mapa de Visualización UAV	19
9	indicadores de vuelo para un UAV	20
10	Modelo 3d UAV en la Interfaz	21
11	Gráficas de funcionamiento UAV	21
12	Costos desarrollo Controlador	22
13	Esquemático Circuito Impreso 1.0	24
14	Layout Circuito Impreso 1.0	25
15	Circuito Impreso Ensamblado 1.0	25
16	Carcasas Versiones	26

Índice de cuadros

1 Abstract

This thesis addresses the critical need for efficient data management and operational control in fixed-wing UAVs, targeting the gaps in current commercial flight controllers. The developed flight controller resolves issues related to data storage, retrieval, and bidirectional communication for flight preprogramming both in-flight and on the ground. Key technical features include support for up to 16 actuators, an alarm buzzer, and real-time telemetry to a ground station. The controller operates in two modes: auto-stabilized and fly-by-wire, and monitors critical variables such as temperature, pressure, altitude, yaw, pitch, roll, and GPS coordinates in real-time. The controller was tested in a fixed-wing UAV. The tests demonstrated the system's reliability and effectiveness in maintaining stable flight conditions and accurate data logging. It is important to highlight that all these improvements were embedded into a single system, making it innovative. A noteworthy aspect is the shift from the traditional STM32 architecture to the ESP32-S3, enhancing the system's capabilities. This innovation significantly enhances UAV data management, operational efficiency, and safety, impacting UAV operators and researchers by providing a robust, reliable, and efficient flight control system.

Resumen

Esta tesis aborda la necesidad crítica de una gestión eficiente de datos y control operativo en UAVs de ala fija, enfocándose en las brechas de los controladores de vuelo comerciales actuales. El controlador de vuelo desarrollado resuelve problemas relacionados con el almacenamiento de datos, recuperación y comunicación bidireccional para la preprogramación de vuelos tanto en vuelo como en tierra. Las características técnicas clave incluyen soporte para hasta 16 actuadores, un buzzer de alarma y telemetría en tiempo real a una estación terrestre. El controlador opera en dos modos: autoestabilizado y fly-by-wire, y monitorea en tiempo real variables críticas como temperatura, presión, altitud, yaw, pitch, roll y coordenadas GPS. El controlador fue probado en un UAV de ala fija. Las pruebas demostraron la fiabilidad y efectividad del sistema para mantener condiciones de vuelo estables y un registro de datos preciso. Es importante destacar que todas estas mejoras fueron embebidas en un solo sistema, lo que lo hace novedoso. Un aspecto notable es el cambio de la arquitectura tradicional STM32 a la ESP32-S3, mejorando las capacidades del sistema. Esta innovación mejora significativamente la gestión de datos, la eficiencia operativa y la seguridad de los UAVs, impactando a operadores e investigadores de UAVs al proporcionar un sistema de control de vuelo robusto, fiable y eficiente.

2 Agradecimientos

En primer momento quisiera agradecer a Juana Valentina Camacho, quien ha sido la persona que me ha motivado, ayudado y apoyado en todo este proceso. Seguidamente quisiera agradecer a mi asesora Alba Avila Bernal, quien me brindo un excelente apoyo y ayuda durante este proceso investigativo.

También quisiera agradecer al personal de la Universidad que me ayudo a lo largo de este proyecto, especialmente al técnico del laboratorio de circuitos impresos, Alejandro Monroy Ocasiones. A William y al profesor Felipe Forero por su asesoría en el ambito de comunicaciones.

Quisiera agradecer a mi familia, a mi padre, a mi madre y a mis abuelos por haberme dado todo el amor y ayuda durante estos 4 años de universidad. Agradezco a mi amigo Jorge Luis Montes por haberme ayudado en cualquier problema que se me presentará durante el proceso de desarrollo de la tesis y a lo largo de la universidad.

Finalmente y no menos importante a la iniciativa estudiantil RAS Uniandes, de la cual fui miembro por 4 años y con la que pude desarrollar este proyecto. Seguidamente mi más fervoroso agradecimiento a todas las personas que ayudaron y colaboraron en el proyecto **RAS-UAV Uniandes**. A Jorge Humberto Roca por haberme asesorado en todo el proceso del proyecto; a Simon Pineda por haberme ayudado a desarrollar la interfaz, a Rene Fonseca y Juan David Alfonso por haber resuelto todo el cableado eléctrico de la aeronave; y a Sara Camila Sanchez, Felipe Gutierrez y a David Rincón por haber realizado las mejoras mecánicas y estructurales de la aeronave.

Finalmente, un agradecimiento a los piloto de vuelo Guillermo Vásquez y Johan Barriga quienes nos ayudaron a operar y pilotar el UAV durante la prueba de vuelo.

"Le vent se lève! . . . il faut tenter de vivre!"
("El viento se levanta!... ¡hay que intentar vivir!")
Paul Valéry

3 Introducción

Este proyecto se enfoca en la investigación y desarrollo de un controlador de vuelo destinado a ser implementado en vehículos aéreos no tripulados (UAVs), en este caso particular un UAV de ala fija. La relevancia de este proyecto radica en el papel crucial que desempeña el controlador de vuelo, siendo este dispositivo el encargado del monitoreo, sensado y control de la aeronave [1].

Los sistemas aéreos no tripulados han sido objeto de desarrollo desde los años 80s. Su evolución ha pasado por varias denominaciones. En la década de 1930 se empezó a utilizar el término “drone”, que traducido literalmente del inglés significa “zángano” y fue de uso extendido hasta la década de los 50. En los años 60 apareció la denominación RPV (Remotely Piloted Vehicle), es decir, vehículo pilotado a distancia. Durante los 80, la Autoridad de Aviación Civil norteamericana introdujo cambios conceptuales al concepto RPV, aplicando la denominación “Remotely Operated Aircraft” (ROA), sustituyendo las palabras “vehículo” por “aeronave” y “pilotado” por “operado” [2].

En Colombia, los UAS son utilizados en diversas aplicaciones. La Fuerza Aérea los emplea para seguridad; en agricultura, se utilizan para fumigar cultivos; en fotogrametría, para estudios topográficos; y en mercadeo, para programas publicitarios, entre otros [3]. De acuerdo a una entrevista realizada a Andrés Gomez, ingeniero electrónico que participó en el desarrollo del Vtool de la Fuerza Aérea Colombiana *coelum*; la mayoría de los controladores de vuelo de los UAV utilizados son comerciales e internacionales. Una evaluación del mercado de empresas como SpeedyBee, Ardupilot y ,ha permitido identificar que, aunque pueden ser adquiridos en el mercado nacional, presentan las siguientes características:

- ◊ Manejan un número de actuadores de 1 a 11
- ◊ Tienen un consumo de 300 mA/h
- ◊ Pesan aproximadamente 10 g
- ◊ El control de la nave puede realizarse solo en el aire o solo en tierra.
- ◊ La operación es ciega, lo que indica que el operador de vuelo solo maneja el transmisor pero no tiene conocimiento de la aeronave, por ejemplo, ángulos de giro, altitud, presión atmosférica, entre otros.
- ◊ Tienen una sola unidad de recolección de movimiento inercial.
- ◊ Los modelos comerciales, como el Speedy Bee, cuentan con un sistema de recopilación de datos encriptados.

El controlador de vuelo propuesto posee características diferenciadoras frente a un controlador de vuelo comercial. Primero, busca ampliar significativamente la capacidad de actuadores disponibles, lo que resultará en una mayor maniobrabilidad y versatilidad del UAV. Por otra parte, da prioridad a la integración de dispositivos especializados incluyendo; altímetro, barómetro, gps y sensores iniciales. Estos proporcionarán datos esenciales como la orientación, velocidad angular, aceleración, longitud, latitud, y posición geográfica. Esto mejorará la seguridad, precisión, confiabilidad y rendimiento general del UAV. Por último, se incluye una pantalla de visualización en el UAV, que permitirá verificar el correcto funcionamiento de la posición GPS, los ángulos de orientación y la altura del dispositivo previamente a una misión de vuelo.

El objetivo de este tesis es proponer un controlador de vuelo, implementarlo en un UAV de ala fija real y realizar pruebas de vuelo para evaluar su rendimiento. Esta investigación tiene como propósito principal mejorar la instrumentación de los UAVs de ala fija, lo cual puede tener un impacto significativo en diversas aplicaciones industriales.

Al culminar este proyecto, se logró monitorear y supervisar los ángulos de giro de la aeronave en tiempo real (Yaw Pitch, Roll), así como la altitud, posición GPS y presión atmosférica. Además, junto con los datos de geolocalización y altitud se logró reconstruir la trayectoria seguida por la aeronave durante la prueba de vuelo. Esto puede ser de gran utilidad para industrias en donde se requiera monitoreo constante de aeronaves no tripuladas.

4 Estado del Arte

En los últimos años, la investigación en controladores de vuelo para UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados) ha avanzado considerablemente, centrando sus esfuerzos en el desarrollo de sistemas integrados y eficientes. Una de las áreas más destacadas ha sido la implementación de sistemas de control en tiempo real (RTOS, por sus siglas en inglés), que facilitan una gestión eficiente tanto de las tareas críticas como de las no críticas dentro del controlador de vuelo. Sistemas como el propuesto por Rico et al., hacen uso de arquitecturas de hardware modulares y sistemas operativos híbridos que combinan la planificación First Come First Serve (FCFS) y Earliest Deadline First (EDF) para optimizar la ejecución de tareas, incrementando así la robustez y fiabilidad del controlador [4] [5].

Otra área clave de investigación es la integración de sensores redundantes y la mejora en la precisión de las lecturas mediante técnicas de amortiguación mecánica. Por ejemplo, en el sistema URpilot, los sensores se distribuyen en una arquitectura de placa flexible para reducir el ruido y las vibraciones mecánicas, lo cual mejora la estimación de la actitud del UAV. Además, se están desarrollando métodos avanzados para la fusión de datos provenientes de múltiples unidades de medida inercial (IMUs) y para la detección de fallos en tiempo real, aspectos críticos para asegurar la fiabilidad del vuelo en condiciones adversas [5].

En términos de hardware, se ha logrado una optimización significativa mediante el uso de microcontroladores basados en la arquitectura ARM Cortex-M, como el STM32F767 utilizado en la placa URpilot. Este microcontrolador ofrece un alto rendimiento y capacidades de procesamiento en tiempo real, fundamentales para las aplicaciones profesionales de los UAVs. La incorporación de redundancia a nivel de sensores en esta arquitectura también mejora la precisión y fiabilidad de las mediciones críticas para el control de vuelo [5].

Recientemente, se ha propuesto un RTOS simplificado y específico para aplicaciones de UAV, con el objetivo de aumentar la velocidad de ejecución de tareas, minimizar la latencia y facilitar el uso para los programadores. Este sistema emplea un planificador híbrido en el cual las tareas críticas en tiempo real son controladas por un marco FCFS, mientras que las tareas no críticas son gestionadas por un marco EDF con prioridad dinámica. Esta configuración permite que las tareas no críticas puedan ser manejadas como tareas en tiempo real si su prioridad dinámica alcanza un valor máximo, asegurando una mayor flexibilidad y eficiencia en la gestión de las tareas del UAV [5].

5 Planteamiento del problema

En la actualidad, los controladores de vuelo enfrentan desafíos significativos en la gestión y control de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) debido a la complejidad y las exigencias de las operaciones en tiempo real. La investigación reciente en controladores de vuelo ha avanzado considerablemente, destacándose la implementación de sistemas de control en tiempo real (RTOS) que optimizan la gestión de tareas críticas y no críticas, mejorando la robustez y fiabilidad del sistema. Asimismo, la integración de sensores redundantes y técnicas de amortiguación mecánica han mejorado la precisión de las lecturas y la estimación de la actitud del UAV, asegurando la fiabilidad del vuelo en condiciones adversas. El uso de microcontroladores avanzados como el ARM Cortex-M ha permitido una optimización significativa en términos de rendimiento y capacidades de procesamiento en tiempo real.

A pesar de los avances tecnológicos, actualmente los controladores de vuelo presentan algunas deficiencias. En primera instancia, tienen un número de actuadores limitado que pueden controlar. Además, presentan una falta de indicadores visuales y auditivos para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo previamente al vuelo. De igual forma, estos dispositivos no tienen incorporado un sistema de telemetría, sino que este se adiciona como un modulo externo. Además, se hace necesario explorar microcontroladores que tengan mayor poder de procesamiento que los que se usan en la actualidad.

Por tanto, se quiere optimizar y mejorar el sistema aéreo no tripulado mediante el desarrollo de un controlador de vuelo que ofrezca mayor fiabilidad y efectividad para mantener condiciones de vuelo estables, así como un monitoreo constante de la aeronave. Esto mediante la implementación de un mecanismo de redundancia en el sistema de movimiento inercial, así como indicadores de funcionamiento durante el vuelo. Adicionalmente, se cuenta con un sistema de telemetría que le permite al controlador a su vez ser un estación en tierra. Esto incluye la implementación de sistemas de control avanzados, integración de sensores de alta precisión, y el uso de microcontroladores de última generación, asegurando así una operación óptima para los UAVs en diversos entornos y condiciones de vuelo.

6 Planteamiento del problema

En la actualidad, los controladores de vuelo enfrentan desafíos significativos en la gestión y control de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) debido a la complejidad y las exigencias de las operaciones en tiempo real. La investigación reciente en controladores de vuelo ha avanzado considerablemente, destacándose la implementación de sistemas de control en tiempo real (RTOS) que optimizan la gestión de tareas críticas y no críticas, mejorando la robustez y fiabilidad del sistema. Asimismo, la integración de sensores redundantes y técnicas de amortiguación mecánica han mejorado la precisión de las lecturas y la estimación de la actitud del UAV, asegurando la fiabilidad del vuelo en condiciones adversas. El uso de microcontroladores avanzados como el ARM Cortex-M ha permitido una optimización significativa en términos de rendimiento y capacidades de procesamiento en tiempo real.

A pesar de los avances tecnológicos, actualmente los controladores de vuelo presentan algunas deficiencias. En primera instancia, tienen un número de actuadores limitado que pueden controlar. Además, presentan una falta de indicadores visuales y auditivos para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo previamente al vuelo. De igual forma, estos dispositivos no tienen incorporado un sistema de telemetría, sino que este se adiciona como un modulo externo. Además, se hace necesario explorar microcontroladores que tengan mayor poder de procesamiento que los que se usan en la actualidad.

Por tanto, se quiere optimizar y mejorar el sistema aéreo no tripulado mediante el desarrollo de un controlador de vuelo que ofrezca mayor fiabilidad y efectividad para mantener condiciones de vuelo estables, así como un monitoreo constante de la aeronave. Esto mediante la implementación de un mecanismo de redundancia en el sistema de movimiento inercial, así como indicadores de funcionamiento durante el vuelo. Adicionalmente, se cuenta con un sistema de telemetría que le permite al controlador a su vez ser un estación en tierra. Esto incluye la implementación de sistemas de control avanzados, integración de sensores de alta precisión, y el uso de microcontroladores de última generación, asegurando así una operación óptima para los UAVs en diversos entornos y condiciones de vuelo.

7 Objetivos

7.1 Objetivo General

Desarrollar un controlador de vuelo para UAVs de ala fija que priorice las condiciones de almacenamiento y recuperación de datos de vuelo. El controlador deberá soportar hasta 16 actuadores, incorporar indicadores de funcionamiento, y permitir la comunicación bidireccional para la programación de vuelos desde el aire o la tierra. El controlador también debe tener la capacidad de ser una Ground Control Station (CGS) para obtener datos en tierra.

7.2 Objetivos Específicos

1. Diseño del Controlador:

Diseñar un controlador de vuelo que cumpla con los requisitos para ser aplicado en un UAV de ala fija. Este proceso incluirá la selección y disposición de componentes electrónicos en la PCB, seguido de una fase de implementación que implicará la verificación del diseño a través del uso del dispositivo en condiciones reales de operación.

2. Diseño de Firmware e Interfaces de Vuelo:

Desarrollar el Firmware necesario para el controlador de vuelo diseñado, incluyendo algoritmos de control, sistemas de comunicación con los sensores y actuadores del UAV, así como el software de las interfaces de vuelo para el monitoreo del sistema.

3. Implementación del Controlador de Vuelo en un UAV de Ala Fija:

Instalar y operar el controlador de vuelo diseñado en un UAV de ala fija real. Se llevará a cabo la integración física del controlador en la aeronave, realizando la conexión con los sensores y actuadores específicos del UAV de ala fija, se realizará una prueba de vuelo para verificar el funcionamiento del controlador en condiciones reales de operación.

8 Marco teórico

Un sistema aéreo no tripulado está compuesto por (ver figura 1): una o varias aeronaves, denominadas Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV), sus cargas útiles, las estaciones de control en tierra (y, a menudo, otras estaciones remotas), sistemas de lanzamiento y recuperación de aeronaves, sistemas de soporte, comunicación, transporte y el componente humano requerido para su operación[2].

La arquitectura de un Sistema Aéreo No Tripulado (UAS) integra múltiples componentes esenciales para su funcionamiento eficiente y seguro. Los UAVs son las plataformas aéreas del sistema, equipadas con sistemas de propulsión, navegación, y control, así como diversas cargas para misiones específicas, como cámaras, sensores térmicos o equipos de recolección de datos ambientales. La estación de control en tierra (GCS) es el núcleo operativo del UAS, donde los operadores supervisan y dirigen el vuelo del UAV, analizan la información recibida y toman decisiones críticas durante la misión. Los sistemas de comunicación, que pueden incluir enlaces satelitales y de radiofrecuencia, aseguran una transmisión de datos continua y fiable entre el UAV y la estación de control, permitiendo un control preciso y seguro del vehículo en diversas condiciones operativas [2].

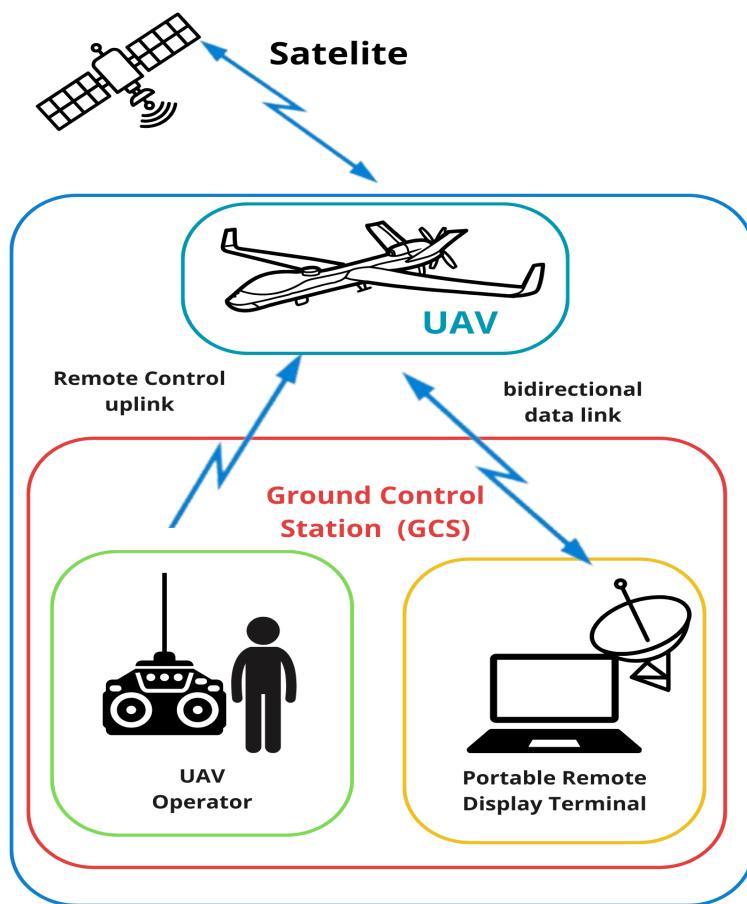


Figura 1: Sistema aéreo no tripulado (UAS)

El subsistema de comunicación es crucial en esta arquitectura, ya que asegura la transmisión bidireccional de datos entre el UAV y la GCS. Este sistema puede incluir enlaces de radiofrecuencia, satelitales y otros

métodos de comunicación redundantes para garantizar la conectividad continua y la seguridad operativa. Una condición importante a tener en cuenta es que los UAS se diseñan para ser operados sin tripulación a bordo de la aeronave. Esto impone la demanda de un control o una unidad de toma de decisiones que debe asumir esta responsabilidad. La combinación de estos elementos permite a los UAS realizar misiones complejas y prolongadas, proporcionando una plataforma flexible y robusta para una amplia gama de aplicaciones [2].

8.1 UAV

Un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV), comúnmente conocido como drone, es una aeronave sin tripulación humana a bordo que requiere un sistema de control eficiente para llevar a cabo una variedad de tareas. Estas tareas pueden incluir misiones de vigilancia, mapeo, entrega de carga, inspección, entre otras [6].

8.1.1. UAV de ala fija

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) de ala fija, también conocidos como drones de ala fija, se caracterizan por sus alas sin movimiento rotacional y su incapacidad para volar verticalmente [7]. A diferencia de los drones multirotor, estos UAVs ofrecen ventajas significativas, como mayor seguridad al no tener hélices giratorias constantes, una mayor eficiencia en el vuelo gracias a su capacidad para planear con el aire, mayor autonomía de vuelo debido a un menor consumo de batería, y la capacidad de cubrir áreas extensas [8]. Además, son resistentes a condiciones climáticas adversas y tienen un costo más económico en comparación con otros tipos de drones. Sin embargo, requieren un espacio amplio para el despegue y el aterrizaje, lo que los hace ideales para aplicaciones que involucran exploración extensa y operaciones en terrenos variados [7].



Figura 2: Dron de ala fija MQ-9 Reaper Hunter [9]

8.2 Ground Control Station (GCS):

La Ground Control Station (GCS) es una parte integral de los Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS) que desempeña un papel crucial en la operación y control del UAV. Según la referencia de la Fuerza Aérea Colombiana [2], la GCS se compone de dos componentes principales:

8.2.1. Interfaz de la GCS:

Terminal de Visualización Remota Portátil: Esta interfaz proporciona a los operadores una plataforma para monitorizar y controlar el UAV. Incluye pantallas y dispositivos de entrada que permiten la visualización en tiempo real de los datos de vuelo y la telemetría del UAV, así como la capacidad de enviar comandos al UAV. La interfaz es esencial para la gestión de misiones y la toma de decisiones durante el vuelo.

:

8.2.2. Operador del UAV:

El operador es responsable de la supervisión directa y el control del UAV a través de la GCS. Utiliza dispositivos de control remoto y la interfaz de la GCS para dirigir el vuelo, realizar ajustes en tiempo real y responder a

cualquier eventualidad que pueda surgir durante la operación del UAV. El operador aéreo debe estar entrenado y ser competente en el manejo de los sistemas y procedimientos del UAS.

8.3 Controlador de Vuelo

Un controlador de vuelo consiste esencialmente en un circuito electrónico con distintos componentes electrónicos tales como micro-chips, condensadores, capacitores, resonadores, inductores, entre otros. Este dispositivo se comporta en esencia como el cerebro de un drone, puesto que tiene un procesador que computa todos los datos referentes a la aeronave y ejecuta acciones de control en el vuelo. Además, posee un software que supervisa las acciones del drone. Las funciones del controlador pueden ser divididas en tres categorías principales: percepción, control y comunicación [10].

En el ámbito de la percepción, el controlador de vuelo se enlaza con una serie de sensores que proveen información vital, como la altura, orientación y velocidad del dron. Estos sensores incluyen unidades de medición inercial (IMU) para calcular la velocidad angular y la aceleración, barómetros para la altitud y sensores de distancia para detectar obstáculos. El controlador procesa y combina esta información sensorial para generar acciones de control eficaces y precisas [10].

Por otro lado, en el ámbito de control el controlador de vuelo efectúa las acciones de movimiento del dispositivo, regulando el movimiento de los distintos actuadores del UAV, tales como motores y servomotores para regular las dinámicas de vuelo de la aeronave. Es importante tener en cuenta que en la creación de un controlador de vuelo para UAV de ala fija, se debe diseñar un sistema capaz de gestionar de manera precisa y coordinada los alerones, timón y cola de la aeronave. Esto implica la necesidad de un control preciso de las superficies de control del UAV, como los alerones para el balanceo, el timón para el giro y la cola para el control de cabeceo, para garantizar una navegación estable y maniobras precisas en vuelo.

Por su parte, en el ámbito de comunicaciones, el controlador de vuelo es capaz de comunicarse en tierra con la estación en base. De tal forma que se pueda efectuar una comunicación bidireccional entre el operador de vuelo y el UAV. Además, requiere la integración de un sistema de posicionamiento por satélite (GPS) para conocer la posición en tiempo real del UAV.

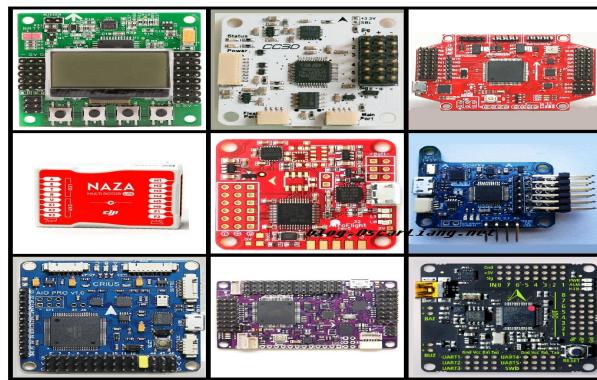


Figura 3: Controladores de Vuelo [11]

8.4 Ejes iniciales del avión

Los ejes de simetría de un avión se conocen como: *yaw*, *pitch* y *roll*. Estos términos se refieren a las tres dimensiones en las que una aeronave en vuelo puede rotar. Estos ejes, que se mueven y rotan con el vehículo, son fundamentales para el control y la maniobrabilidad de una aeronave. [8]

8.4.1. Yaw o eje vertical:

Este eje va de arriba abajo, perpendicular a los otros dos ejes y paralelo al fuselaje. El movimiento alrededor de este eje se denomina *yaw*, y un movimiento positivo en esta dirección mueve la nariz de la aeronave hacia la derecha, siendo el timón la principal superficie de control.[8]

8.4.2. Pitch o eje transversal:

Extendiéndose de izquierda a derecha desde la perspectiva del piloto y paralelo a las alas, este eje controla el movimiento de **pitch**. Un movimiento positivo eleva la nariz de la aeronave y baja la cola, siendo controlado principalmente por las elevaciones.[8]

8.4.3. Roll o eje longitudinal:

Este eje recorre la aeronave de cola a nariz, en la dirección normal de vuelo. El movimiento alrededor de este eje, conocido como *roll*, implica levantar un ala mientras se baja la otra. Los alerones son los principales controladores de este movimiento, aunque el timón también puede influir secundariamente.[8]

Los movimientos alrededor de estos ejes son producidos por torques o momentos, que en las aeronaves se generan intencionalmente mediante el movimiento de superficies de control. Las elevaciones en la cola horizontal controlan el *pitch*, el timón en la cola vertical controla el *yaw*, y los alerones en las alas, que se mueven en direcciones opuestas, controlan el *roll*. En el caso de las naves espaciales, estos movimientos suelen ser producidos por un sistema de control de reacción que utiliza pequeños propulsores para aplicar empuje asimétrico.[8]

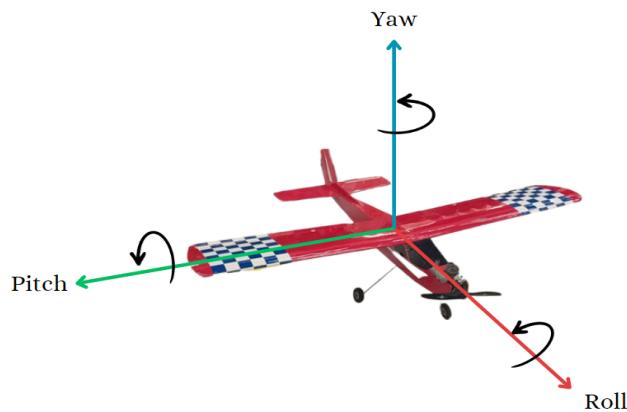


Figura 4: Movimientos Iniciales de un UAV: Yaw, Pitch, Roll

8.5 Main control unit (MCU)

Una MCU, o unidad de control principal, es una plataforma integrada que alberga un procesador, memoria y múltiples pines para la interacción con el entorno. En UAVs, la MCU es crucial para la lectura de señales de los sensores, como GPS y giroscopios, y para el envío de comandos a los actuadores del vehículo, permitiendo así el vuelo autónomo y la navegación precisa. [12]

8.6 Unidad de Medida Inercial (IMU)

Una Unidad de Medida Inercial (IMU) es un dispositivo electrónico que mide y reporta la velocidad angular y la aceleración de un objeto para determinar su orientación y velocidad de movimiento. Principalmente, la IMU se utiliza en la navegación de aeronaves, UAVs, misiles y satélites, operando de manera independiente y libre de interferencias de sistemas externos. Está compuesta por acelerómetros, giróscopos y magnetómetros, los cuales, mediante el uso de algoritmos de fusión de sensores, ayudan a proporcionar datos garantizados sobre la actitud, posición y velocidad, lo que resulta en una alta fiabilidad del sistema contra posibles fallos de los sensores. [13]

8.7 Superficies de control

Las superficies de control son componentes aerodinámicos móviles esenciales en la aviación, cuya manipulación permite al piloto modificar la aerodinámica del avión para lograr el desplazamiento deseado sobre sus ejes y seguir la trayectoria de vuelo establecida. Existen tres tipos principales de superficies de control: ailerones, elevadores y el timón de dirección. Cada una de estas superficies es responsable del control del movimiento en torno a un eje específico del avión.

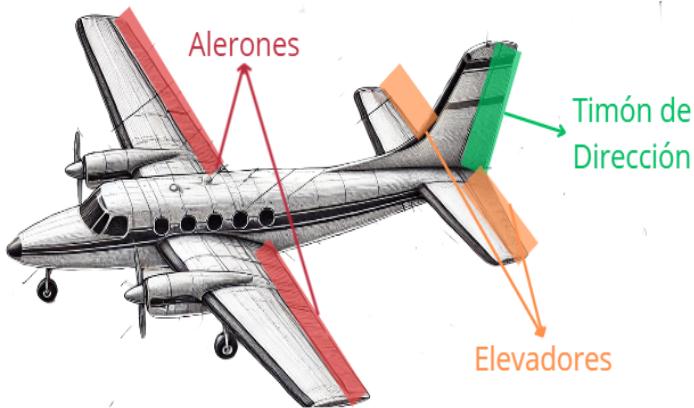


Figura 5: Superficies de control en una aeronave

8.8 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El GPS (Sistema de Posicionamiento Global) permite la ubicación geográfica de cualquier objeto en el mundo mediante la triangulación de señales en una red de satélites. Este sistema es crucial en la navegación precisa y el control de vuelo de los UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados), ya que les permite conocer su posición exacta en tiempo real. [14]

8.9 Indicadores de vuelo

Los indicadores de vuelo proporcionan información fundamental sobre las condiciones y la orientación del UAV, permitiendo a los operadores realizar ajustes necesarios para asegurar una operación de vuelo en condiciones seguras. En este proyecto, hemos implementado los siguientes indicadores de vuelo:

- ◊ **Anemómetro:** Este dispositivo mide la velocidad del aire en relación con el UAV. Es crucial para determinar la velocidad relativa del UAV y ajustar la velocidad de vuelo para mantener un control adecuado y eficiente.
- ◊ **Horizonte Artificial:** Este indicador muestra la orientación del UAV en relación con el horizonte terrestre. Es fundamental para mantener el equilibrio y la estabilidad durante el vuelo, proporcionando información sobre el ángulo de inclinación y el cabeceo del UAV.
- ◊ **Altímetro:** El altímetro mide la altitud del UAV sobre el nivel del mar. Esta información es vital para mantener el UAV a una altura segura y para cumplir con las regulaciones de espacio aéreo.
- ◊ **Indicador de Dirección:** Este dispositivo muestra la dirección del vuelo en relación con el norte geográfico. Es esencial para la navegación y para seguir una ruta de vuelo planificada.
- ◊ **Indicador de Altitud:** Similar al altímetro, este indicador proporciona información sobre la altitud, pero está calibrado para mostrar variaciones más precisas y rápidas en la altitud del UAV, lo cual es útil para maniobras precisas y ajustes rápidos.

8.10 Normativa seguida en el desarrollo del proyecto

En el desarrollo del proyecto se siguieron los conceptos y esquemas propuestos en la Circular 328-AN/190 de la OACI [15]. Conforme a la normativa, se implementaron sistemas de mando y control (C2) fiables, asegurando la capacidad del piloto remoto para operar el UAV de manera segura y eficiente en todo momento.

Se tomaron en cuenta tanto los estándares existentes para aeronaves tripuladas como los específicos para abordar las diferencias operativas, legales y de seguridad entre aeronaves tripuladas y no tripuladas. El proyecto garantizó que siempre hubiera un piloto responsable de la operación del UAV, manteniendo la capacidad del piloto remoto para intervenir y gestionar el vuelo cuando fuera necesario, cumpliendo así con las reglas del aire del Estado y el espacio aéreo correspondiente.

Asimismo, se estudió el término *aeronave pilotada a distancia* (RPA) para reflejar el estatus de estas aeronaves como pilotadas por un piloto remoto con licencia, ubicado en una estación externa a la aeronave, quien monitorea y gestiona el vuelo en todo momento. Esto aseguró una capacidad operativa comparable a la de las aeronaves tripuladas, permitiendo una intervención y control inmediatos del vuelo.

El proyecto también consideró la posible expansión de los roles de las RPA, aprovechando sus beneficios naturales como largas duraciones de vuelo, capacidades operativas encubiertas y costos operativos reducidos, aplicables a áreas como la seguridad, la agricultura y el análisis ambiental. Todo esto se realizó siguiendo los estándares y regulaciones definidos para garantizar la integración segura y efectiva de las RPA en el ecosistema de la aviación civil.

9 Metodología

La metodología para el desarrollo del controlador de vuelo para un UAV de ala fija se puede observar en la figura 6, en esta figura se observa la estructuración del proyecto en varias etapas, desde la investigación inicial hasta la prueba de vuelo. Comienza con la investigación y la creación de un diagrama funcional, seguido del desarrollo del hardware, el enclosure electrónico, el firmware y la interfaz de usuario. El hardware incluye el diseño y la fabricación electrónica del controlador de vuelo, mientras que el enclosure electrónico es el encargado de dar soporte y protección al circuito. Finalmente, el firmware abarca la adquisición de datos, telecomunicaciones y control de actuadores, y la interfaz se encarga de la visualización de dichos datos. Tanto el firmware como la interfaz de usuario se revisan para asegurar su correcto funcionamiento. Finalmente, se realizan pruebas locales y de vuelo para validar el sistema completo.

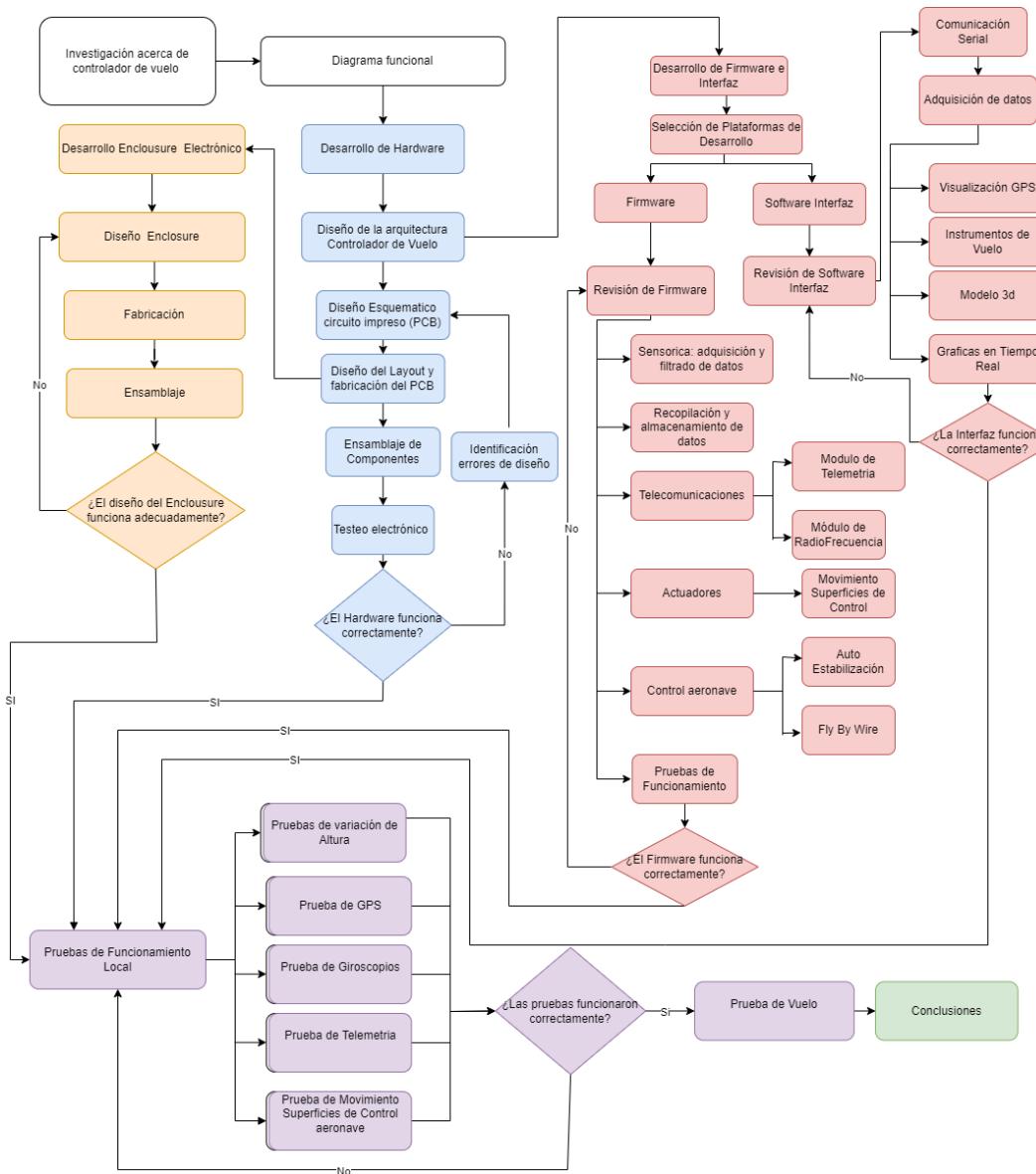


Figura 6: Diagrama Metodología Implementada

10 Diagrama Funcional

En la figura 7 se muestra el diagrama funcional de un controlador de vuelo de UAV de ala fija, este incluye los siguientes componentes esenciales: un barómetro para el cálculo de la presión atmosférica, una unidad de movimiento inercial para calcular la orientación, y un módulo GPS para la localización. Un procesador central que analiza los datos de estos sensores y ejecuta los algoritmos de control. Así mismo una forma de controlar los servomotores, que forman parte del sistema de control de actuadores de vuelo, implementando las órdenes del procesador para manejar los alerones, timón, elevadores y el sistema de propulsión. La unidad de alimentación eléctrica provee la energía necesaria para todos los componentes. Un módulo de telemetría y un módulo de enlace por radiofrecuencia que permiten la transmisión y recepción de datos, facilitando la supervisión y el control remota. Finalmente, una unidad de visualización de datos críticos en tiempo real y una unidad de almacenamiento que registra la información relevante del vuelo.

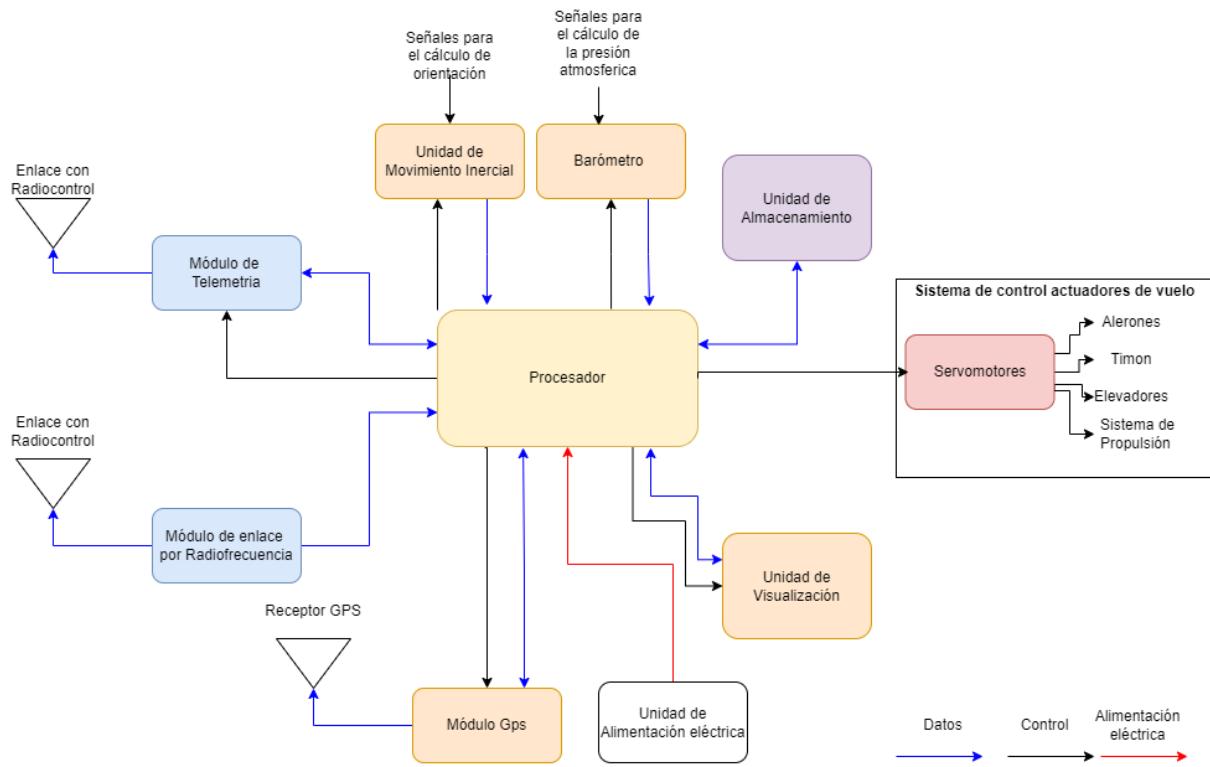


Figura 7: Diagrama de bloques del Controlador de Vuelo para UAV de ala fija

11 Interfaz

La interfaz de usuario desarrollada para el UAV de ala fija incluye varios componentes que permiten una visualización integral de los parámetros de vuelo y el estado de la aeronave en tiempo real. Los parámetros considerados más cruciales se han incorporado en diferentes secciones de la interfaz, facilitando el monitoreo y el control efectivo del UAV. A continuación se describen estos componentes:

11.1 Mapa de Posición en Tiempo Real

En la figura 8 se puede observar un apartado en el que se observa la posición del UAV en tiempo real utilizando un mapa interactivo. La posición actual se muestra con coordenadas de latitud y longitud, permitiendo un seguimiento preciso del UAV durante su vuelo.

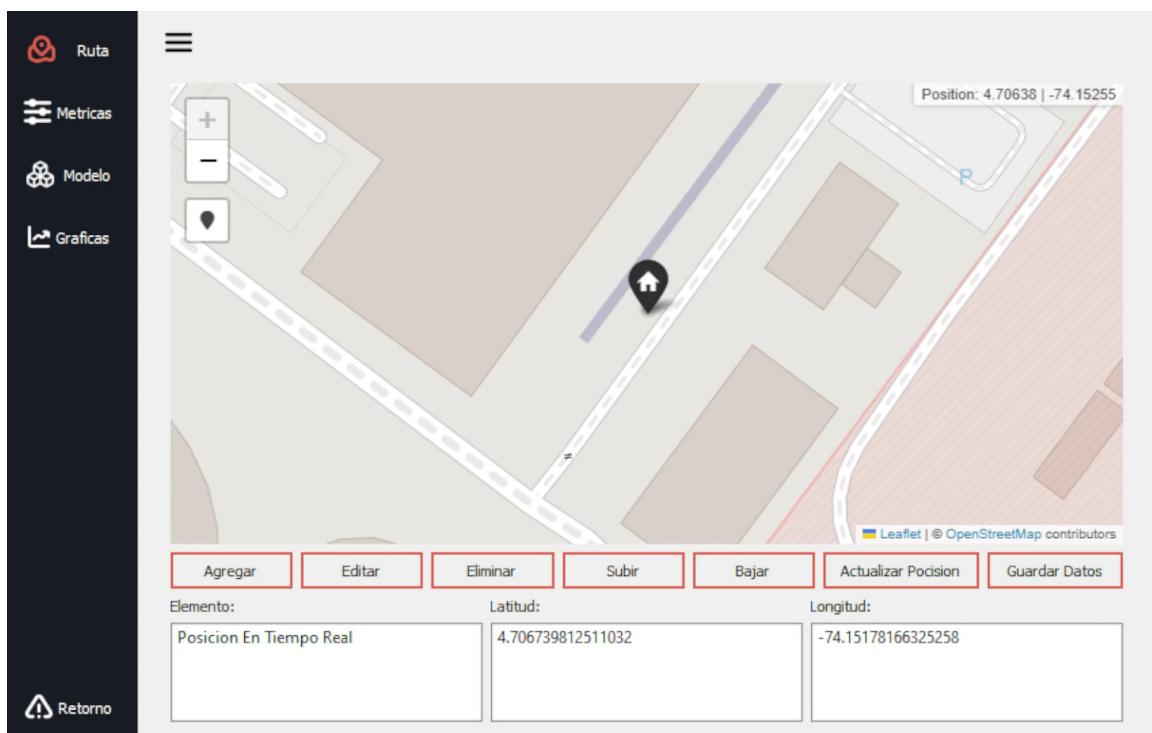


Figura 8: Mapa de Visualización UAV

11.2 Indicadores de Vuelo:

Los indicadores de vuelo se presentan mediante instrumentos de control similares a los que se encuentran en una aeronave real (véase 9). Estos instrumentos incluyen:

- ◊ **Horizonte Artificial:** Indica la actitud del avión en términos de yaw, pitch y roll.
- ◊ **Altímetro:** Mide la altitud del UAV con referencia a la altitud inicial del dispositivo.
- ◊ **Barómetro:** Indica la presión atmosférica.
- ◊ **Airspeed:** Mide la velocidad del aire.
- ◊ **Manifold Pressure:** Muestra la presión del colector, relevante para el rendimiento del motor.

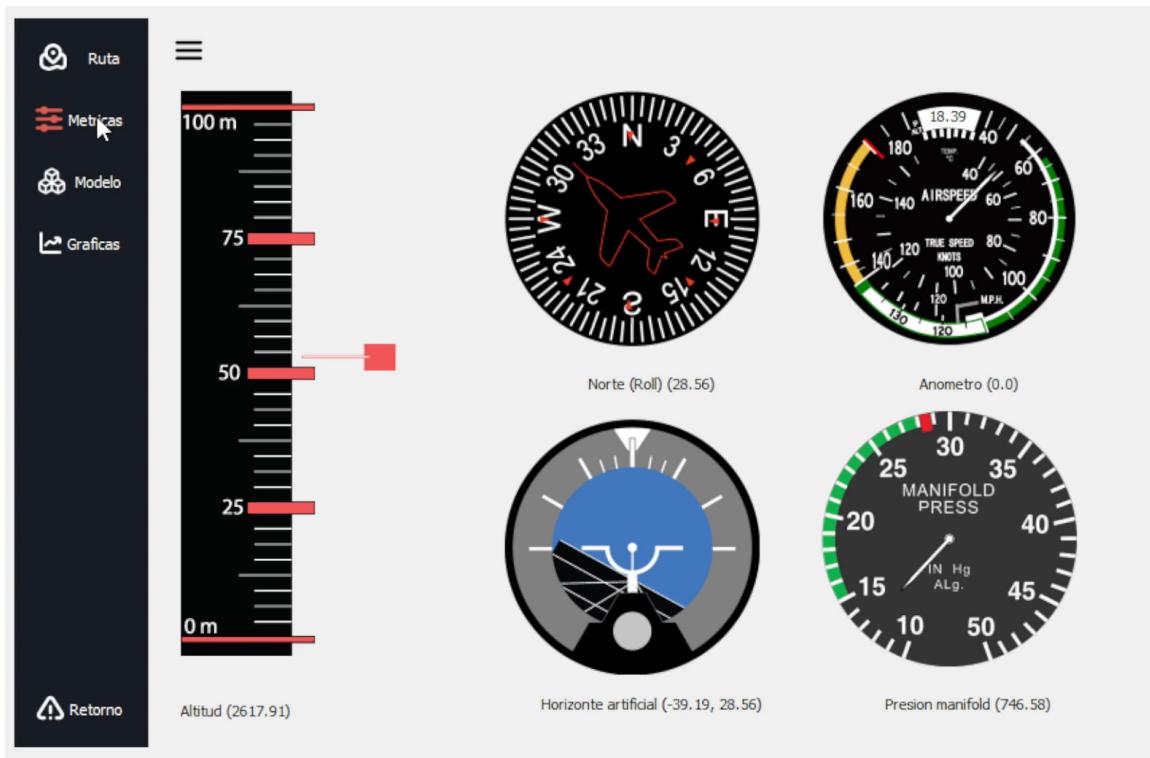


Figura 9: indicadores de vuelo para un UAV

11.3 Modelo 3D del UAV:

Se incluye un modelo tridimensional del UAV que representa su orientación en el espacio **10**. Proporcionando una visualización clara de la dirección hacia donde está apuntando el UAV, facilitando la comprensión de su comportamiento dinámico.

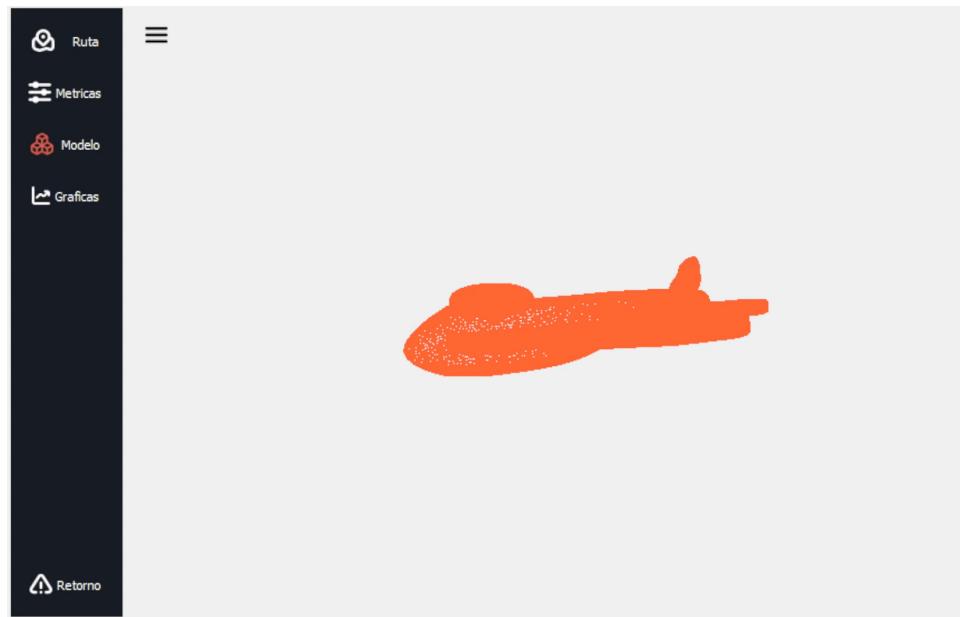


Figura 10: Modelo 3d UAV en la Interfaz

11.3.1. Gráficas en Tiempo Real:

Esta sección permite visualizar diferentes comportamientos históricos de la aeronave. Las gráficas muestran datos como movimientos inerciales (roll, pitch, yaw), altitud, temperatura, presión, y velocidad en función del tiempo. Estas gráficas son cruciales para analizar y evaluar el rendimiento del UAV durante vuelo para observar y analizar el comportamiento histórico de la aeronave.

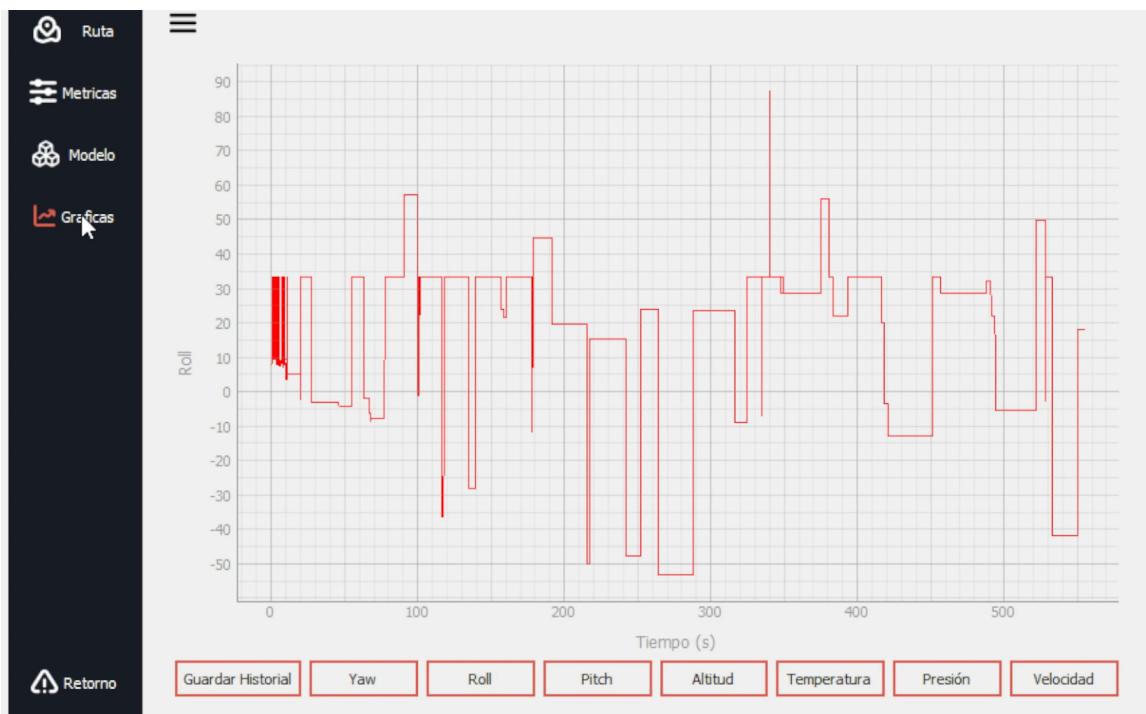


Figura 11: Gráficas de funcionamiento UAV

12 Costos del Sistema

Finalmente se hace necesario resaltar los costos asociados al desarrollo del controlador estos se encuentran en el apartado de Anexos (véase 12). Se resalta que el costo de los componentes electrónicos y mecánicos fue de alrededor de los **\$2'000.000**. Cabe resaltar que el desarrollo del controlador incluyendo la etapa de diseño electrónico, diseño mecánico, software, firmware y pruebas llevo alrededor de 350 horas ocasionando que el costo de desarrollo del controlador de vuelo fuera de cerca de los **\$6'4000.0000** pesos teniendo en cuenta el salario de un ingeniero electrónico promedio en Colombia que es de **\$12.664** por hora .

Item	Imagen/Descripción	Cantidad	Pesos
Radio control Flysky FS-i6 actualizado a 10 canales con receptor		1	\$ 289,995.00
Adafruit 9-DOF orientación absoluta IMU fuga de mezcla - BNO055.		1	\$ 143,635.00
MATEK M10Q-5883 GNSS y brújula soporta GNSS (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou), ofrece una gran sensibilidad de RF para aviones drones		1	\$ 168,458.60
ESP32-S3-DevKit CN16R8		4	\$ 205,672.00
BMP280		2	\$ 15,000.00
Nrf24l01		3	\$ 600,000.00
Módulo Mpu6050		2	\$ 27,000.00
Filamento de Impresión 3d		1	\$ 80,000.00
Tornillos, Conectores,Inserts		1	\$ 20,000.00
Bateria		1	\$ 400,000.00
Horas Trabajadas	El salario ingeniero electronico promedio en Colombia es de \$27.657.404 al año o \$12.664 por hora.	350	\$ 4,432,400.00
Total Sin Impuestos	\$ 6,382,160.60	Total Sin Horas Trabajadas	\$ 1,949,760.60

Figura 12: Costos desarrollo Controlador

13 Conclusiones

En este proyecto se logró hacer el diseño de un controlador de vuelo el cual cumple con todos los requisitos para ser implementado en la operación de un UAV de ala fija. Este diseño se logró implementar y operar en una aeronave real. Esto mediante la conexión exitosa de sensores y actuadores con el controlador de vuelo.

Además, se hizo un diseño del firmware e interfaces de vuelo el cual incluye algoritmos de control y sistemas de comunicación con los sensores. Se lograron transmitir los datos de orientación, altura, presión atmosférica y temperatura a una estación en tierra donde se pudo visualizar y recuperar dicha información.

Adicionalmente, se verificó el funcionamiento de los distintos sensores integrados en la aeronave contribuyendo esto al diseño de un sistema expansible y modular, lo cual facilita futuras mejoras y la integración de nuevos componentes. Fue posible diseñar e implementar un controlador de vuelo que opera efectivamente en condiciones reales de vuelo. Transmitiendo datos de GPS y telemetría en tiempo real se logró correctamente, permitiendo una supervisión constante y la capacidad de analizar estos parámetros en tiempo real mediante el uso de una interfaz.

14 Trabajos Futuros

Durante el desarrollo del proyecto se evidenciaron los siguientes problemas:

- ◊ **Pérdida y Corrupción de Datos:** Durante las pruebas de vuelo, se observó una considerable pérdida y corrupción de datos, especialmente en las variables de altitud y presión. Esta situación se debe a errores en la codificación y decodificación de los datos, así como a limitaciones en la capacidad de transmisión del módulo nRF24L01, que puede manejar solo hasta 32 bits por paquete.
- ◊ **Cuello de Botella en la Transmisión de Datos:** La transmisión de datos generó un cuello de botella, afectando la integridad de la información recibida. Para mitigar este problema, se propone implementar un buffer en la interfaz de la comunicación serial. Este buffer ayudará a gestionar mejor el flujo de datos, asegurando una transmisión más eficiente.
- ◊ **Optimización de la Interfaz de Usuario:** Es esencial optimizar la interfaz de usuario para evitar retrasos y asegurar una visualización más fluida de los datos. Esto mejorará la capacidad de monitoreo en tiempo real y la fiabilidad de la información presentada.

Los tres objetivos principales de mejora que se pueden seguir para hacer del sistema de control de vuelo de mejor calidad, más confiable y fuerte incluyen:

Primero, mejorar el hardware del proyecto al fusionar todos los módulos en una misma placa de circuito impreso, mejorando la eficiencia del dispositivo, reduciendo el ruido y mejorando la conectividad de un módulo a otro. La estabilidad del sistema eléctrico también mejorará con un segundo inversor y un regulador de potencia continuo. Además, un módulo adicional de protección contra el flujo de corriente inversa y un sistema de gestión de baterías (BMS) deben ser parte del sistema para proteger la batería del UAV, lo cual hará que el sistema en su conjunto sea aún más confiable y duradero.

En segundo lugar, se debe seleccionar un módulo de comunicación que tenga más capacidad de transmisión de bits, con una mayor frecuencia de transmisión. Esto mejorará el flujo de datos con menos posibilidades de perdidas. También, con el uso de un sistema de comunicación, como MAVLink, se permitiría detectar fallas en la transmisión de paquetes y tener una fiabilidad mejorada en términos de transmisión de datos.

Finalmente, la interfaz de usuario debería ser mejorada y optimizada. La configuración de un buffer en la interfaz de comunicación serial hará que los datos entrantes se presenten correctamente de manera eficaz, mejorando la interfaz del usuario.

Estas innovaciones permitirán al controlador de vuelo ser más robusto y estable, mejorando la eficiencia, estabilidad y seguridad del sistema, así como la calidad de la interacción con el usuario.

15 Anexos

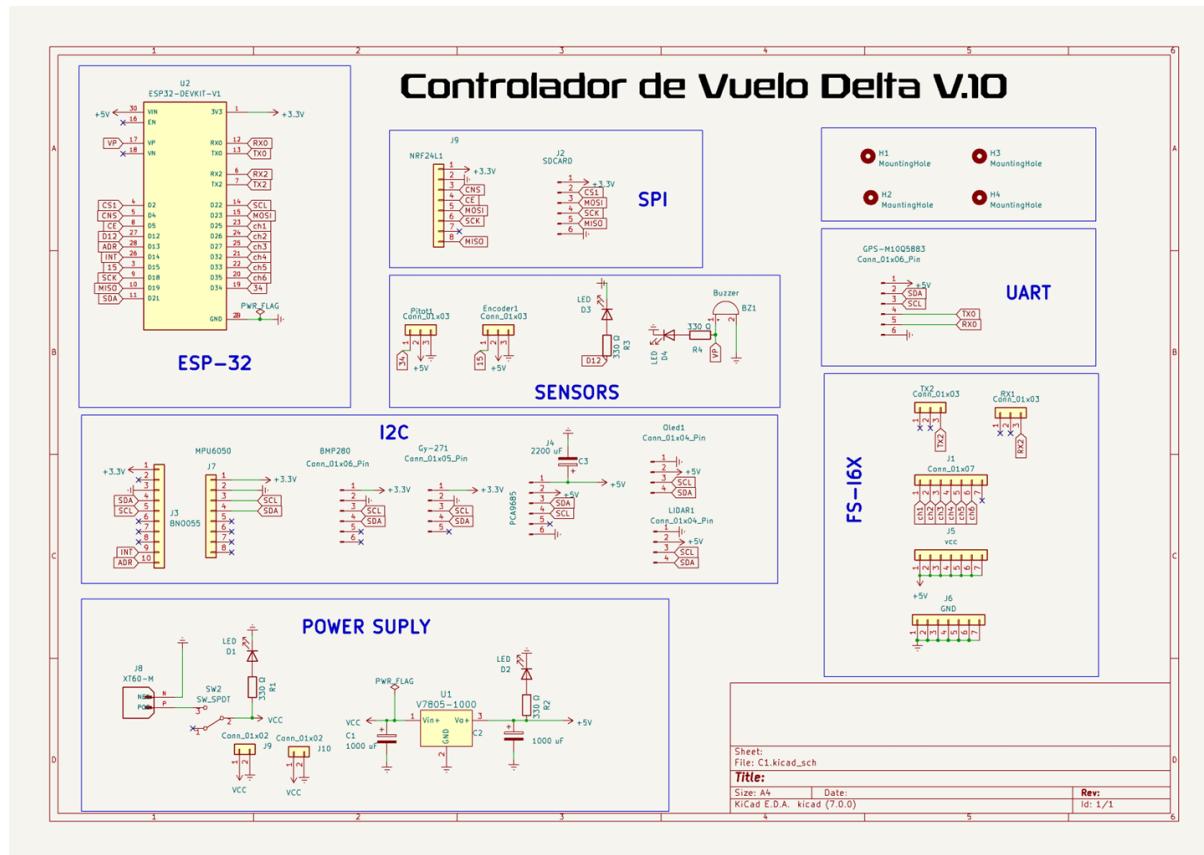


Figura 13: Esquemático Circuito Impreso 1.0

PCB- Design (1.0)

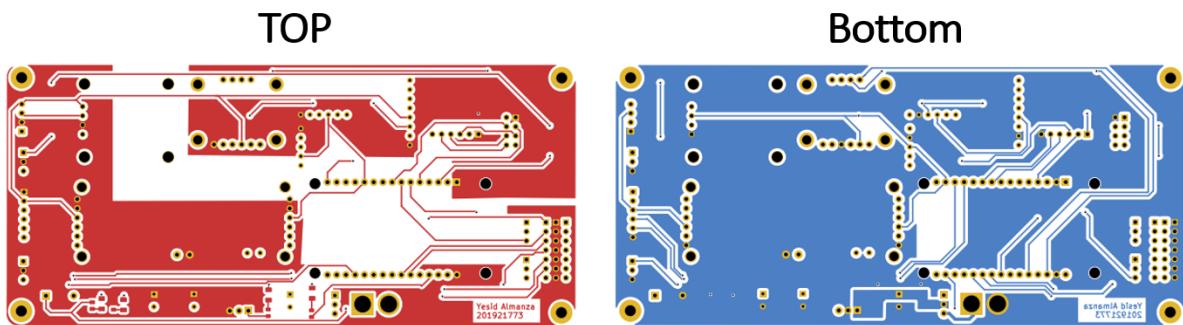


Figura 14: Layout Circuito Impreso 1.0

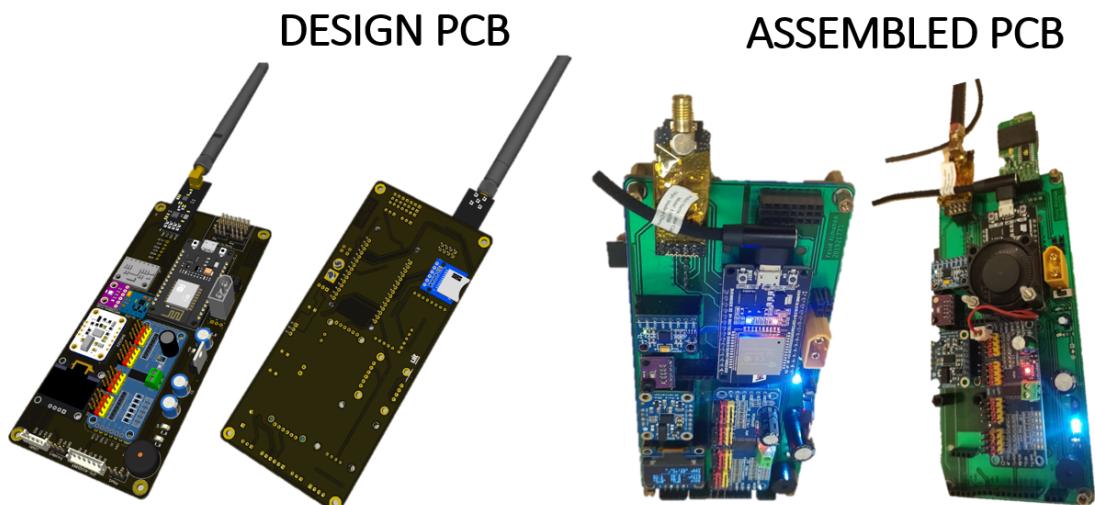


Figura 15: Circuito Impreso Ensamblado 1.0

Carcasa PCB 1.0



Carcasa PCB 2.0



Figura 16: Carcasas Versiones

Referencias

- [1] J. et al. «Flight Controller explained: Understanding FPV Drone Control Systems.» [Accessed: Dec. 5, 2023]. dirección: <https://oscarliang.com/flight-controller-explained/>.
- [2] AAAES, *Guía UASCUAS*, [Online]. Available: https://aaaes.fac.mil.co/sites/aaaes/files/AAAES/documentos/normatividad2022/Guias/guia_uascuas.pdf. [Accessed: Jun. 19, 2024], Fuerza Aérea Colombiana, 2022.
- [3] G. X. B. Barreto, *Antecedentes, uso y aplicación de drones en Colombia como herramienta estratégica de análisis en la agricultura de precisión*, modalidad Investigación, Bogotá, Colombia, jul. de 2023.

- [4] E. S. M. Ebeid, M. Skriver, K. Laursen, K. Jensen y U. Schultz, «A Survey of Open-Source UAV Flight Controllers and Flight Simulators,» *Microprocessors and Microsystems*, vol. 61, 2018. DOI: 10.1016/j.micpro.2018.05.002.
- [5] R. Rico, J. Rico-Azagra y M. Gil-Martinez, «Hardware and RTOS Design of a Flight Controller for Professional Applications,» *IEEE Access*, vol. PP, págs. 1-1, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3232749.
- [6] J. M. Z. Espinosa y E. J. F. B. Galvan, «Diseño e Implementación de un Controlador de Vuelo para un Vehículo Aéreo Autónomo No Tripulado (UAV) Parrot Mambo,» Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Tesis de mtría., Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2023.
- [7] Iaerocol, *¿Qué son los drones de Ala Fija? Aprende Sus Características*, Accessed: Dec. 5, 2023, 2023. dirección: <https://iaerocol.co/blog/que-son-los-drones-de-ala-fija/>.
- [8] J. A. G. Chavarro, «Diseño y Construcción de Vehículo Aéreo No Tripulado Tipo RPV,» Facultad de Ingeniería, Departamento de Automática y Electrónica, Programa Ingeniería Mecatrónica, Tesis de mtría., Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2008.
- [9] D. Update, *Reaper ER Extends RPA Missions to +33 Hours*, Accessed: Mar. 10, 2024, sep. de 2015. dirección: https://defense-update.com/20150916_reaper_er.html.
- [10] *Flight Controllers explained for everyone*, Accessed: Dec. 5, 2023, 2023. dirección: <https://fusion.engineering/flight-controllers-explained-for-everyone/>.
- [11] O. Liang, *Flight Controller Explained: Understanding FPV Drone Control Systems*, Accessed: Mar. 10, 2024, 2023. dirección: <https://oscarliang.com/flight-controller-explained/>.
- [12] E. de redacción de Drew, *MCU: Main control unit, ¿qué es?* Accessed: Mar. 10, 2024, jun. de 2021. dirección: <https://blog.wearedrew.co/mcu-main-control-unit-que-es>.
- [13] U. Navigation, *UAV Navigation en Profundidad: Qué es una IMU y para qué se utiliza*, Accessed: Mar. 10, 2024, feb. de 2022. dirección: <https://www.uavnavigation.com/es/empresa/blog/que-es-un-imu>.
- [14] U. Group, *GPS en Drones: Para qué sirve y cuándo se utiliza*, Accessed: Mar. 10, 2024, ago. de 2023. dirección: <https://umilesgroup.com/gps-drones/>.
- [15] I. C. A. Organization, *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*, 2011.