



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Control de vuelo estacionario de un dron cautivo con estación de energía híbrida

Juan David Velásquez Bran

Dirigido Por: **Iván Felipe Rodríguez Barón M.Sc**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Especialista en Sistemas de Aeronaves No Tripuladas.

Fundación Universitaria Los Libertadores.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas.

Bogotá, Colombia.

2023

Contenido

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
METODOLOGÍA.....	7
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

Tabla de Figuras

Figura 1.....	9
Figura 2.....	10
Figura 3.....	11
Figura 4.....	12
Figura 5.....	13
Figura 6.....	13
Figura 7.....	15
Figura 8.....	16
Figura 9.....	18
Figura 10.....	19

RESUMEN

A pesar de la creciente popularidad de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) en áreas como inspección, agricultura y vigilancia, su autonomía suele estar limitada por restricciones energéticas. Una solución emergente es el dron cautivo o tUAV, que recibe energía y datos desde una fuente en tierra a través de un cable. Este enfoque no solo resuelve el desafío energético, sino que ofrece oportunidades en monitoreo y control. Este estudio presenta un dron diseñado específicamente para volar de manera estable en condiciones desafiantes, utilizando algoritmos de control avanzados y una estación terrestre que suministra energía continua, extendiendo así su autonomía de vuelo. La metodología propuesta presenta un enfoque iterativo y estructurado para el desarrollo y optimización de drones y estaciones terrestres. El proceso se inicia con una revisión bibliográfica y definición de requisitos, seguido por una fase de prototipado que incluye diseño del dron, desarrollo de algoritmos de control y construcción de un prototipo de estación terrestre. Se realizan pruebas y evaluaciones en diversas condiciones para evaluar el rendimiento, eficiencia energética y adaptabilidad del dron. Basado en los resultados, se lleva a cabo una fase de optimización y refinamiento para mejorar todos los sistemas. Finalmente, se documenta y presenta todo el proceso, hallazgos y resultados. Esta metodología asegura un desarrollo sistemático y basado en evidencia, permitiendo adaptaciones y mejoras basadas en desafíos y necesidades emergentes.

Palabras clave: Dron atado – Estación terrestre – Fuente de potencia híbrida - Drone de vuelo de larga duración.

ABSTRACT

Despite the growing popularity of unmanned aerial vehicles (UAVs) in areas such as inspection, agriculture and surveillance, their autonomy is often limited by power constraints. An emerging solution is the captive drone or tUAV, which receives power and data from a ground source via a cable. This approach not only solves the energy challenge, but also offers opportunities in monitoring and control. This study presents a drone specifically designed to fly stably in challenging conditions, using advanced control algorithms and a ground station that supplies continuous power, thus extending its flight autonomy. The proposed methodology presents an iterative and structured approach for the development and optimization of drones and ground stations. The process starts with a literature review and requirements definition, followed by a prototyping phase that includes drone design, development of control algorithms and construction of a ground station prototype. Tests and evaluations are conducted under various conditions to assess the performance, energy efficiency and adaptability of the drone. Based on the results, an optimization and refinement phase are carried out to improve all systems. Finally, the entire process, findings and results are documented and presented. This methodology ensures a systematic and evidence-based development, allowing for adaptations and improvements based on emerging challenges and needs.

Keywords: Tethered Drone – Ground station — Hybrid power source – Long-duration flight drone.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) se han utilizado en diversos campos de la ingeniería, como la inspección (Nikolic et al., 2013), la fumigación de cultivos (Meng et al., 2019), en vigilancia (Motlagh et al., 2017), agricultura de precisión (Zhang & Kovacs, 2012), por mencionar algunas. Sin embargo, a pesar de su creciente uso, los UAVs enfrentan una serie de desafíos, siendo uno de los más prominentes su autonomía limitada de vuelo debido a restricciones energéticas. (Boukoberine et al., 2019). Las baterías actuales permiten, en la mayoría de los casos, menos de 1 hora de operación. (Chang & Hung, 2021a). Para aumentar el tiempo de vuelo se podrían usar baterías más grandes con mayor capacidad, pero eso conduce a sistemas de energía más pesados y una menor capacidad de carga útil de los UAV. Según Marques et al., 2023 propone una solución alternativa que ha ganado auge y es el concepto de dron cautivo o tUAV. Estos vehículos se alimentan desde una fuente en tierra, transmitiendo energía y datos a través de un cable. Dicho cable no solo satisface las necesidades energéticas del dron, sino que también brinda oportunidades en áreas de monitoreo y control. En Muttin, 2011 se investiga la dinámica de vuelo de tUAVs aplicados en la detección de derrames de petróleo y se subraya la necesidad de modelos dinámicos precisos para el manejo adecuado del cable.

El diseño de estos sistemas cautivos ha sido una prioridad en la investigación, autores como Savnik (2015) y Kiribayashi et al. (2015) plantean el desarrollo de plataformas y sistemas de control que permiten la alimentación, comunicación y control de UAVs a través de cables (*tether*). En particular, abordan aspectos como la selección de cables óptimos y la creación de plataformas para el despliegue y control de la atadura.

Los tUAVs han mostrado potencial en áreas especializadas, como la detección de descargas electrostáticas en palas de turbinas eólicas durante tormentas (Montanya et al. 2018). Por su parte, Selim y Kamal, (2018) propusieron el uso de sistemas para restablecer redes de comunicación 4G/5G después de un desastre, obteniendo buenas coberturas y autonomía en los vuelos estacionarios. En una línea similar, Kiribayashi et

al., 2018, presentaron un sistema de MUAV multirotor impulsado por correa para obtener imágenes desde varias perspectivas. La flexibilidad de la correa permitió controlar la tensión en condiciones variables, lo que resultó en un vuelo estacionario efectivo. Esta capacidad de ajustar la tensión de la correa para mantener una posición constante se convierte en un aspecto fundamental en el control de vuelo estacionario.

En cuanto a la estación terrestre, el trabajo de Zikou et al., 2015, propone un sistema *Power-over-Tether* para prolongar el tiempo de vuelo de los tUAVs mediante la transferencia de energía a través de un cable con control autónomo. Esta innovación permitió un vuelo estacionario más estable y de larga duración, especialmente en aplicaciones que requieren largos tiempos de operación. En el contexto del diseño de estaciones de alimentación híbridas, la investigación de Bongermine et al., 2017, propone un control óptimo de gestión de energía para un tUAV. Con el objetivo de mejorar la coordinación y rendimiento de estas plataformas Fagiano, 2017 propone un modelo y enfoque de control jerárquico que optimiza la coordinación y rendimiento.

Marques et al., 2023, enfatizan en su revisión que, a pesar de los avances, aún existen desafíos, en particular con técnicas de control como el PID para el control de vuelo estacionario. Sin embargo, una solución emergente ha sido el uso de múltiples drones en una sola atadura, conocida como MUST, que mejora la maniobrabilidad y reduce los riesgos de colisión (Humann et al., 2023).

La Compañía ELISTAIR en Colombia ha implementado el uso de tUAVs, drones atados, para monitorear multitudes (Elistair, 2020) Estos drones ofrecen una perspectiva aérea constante del área, permitiendo a los equipos de seguridad de la Policía Nacional de Colombia tener un control superior de eventos y reaccionar rápidamente. La capacidad de visualizar la escena completa, enfocarse en situaciones sospechosas y mantener contacto visual ininterrumpido con los equipos en tierra es esencial para garantizar la seguridad y una coordinación efectiva.

Este trabajo contempla un dron de fabricación propia con capacidad para vuelo estable en ciertas condiciones ambientales, con algoritmos de control optimizados y una estación terrestre que extiende la duración del vuelo del dron al proveer una fuente continua de energía. La metodología se basa en un enfoque iterativo y estructurado que aborda las principales áreas del proyecto. Esta investigación no solo contribuye al campo académico, sino que también tiene el potencial de impactar la industria de drones en Colombia, ofreciendo tecnologías más eficientes y resilientes.

Esta investigación es crucial dado que resuelve uno de los problemas más significativos de los UAVs: la limitada autonomía de vuelo debido a restricciones de energía. Al proveer una fuente continua de energía desde una estación terrestre, se extiende significativamente la duración del vuelo, lo que es especialmente valioso en tareas que requieren largos periodos de operación, como el monitoreo prolongado o las operaciones de rescate y vigilancia.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta se basa en un enfoque iterativo y estructurado (Royce, 1970) que aborda las principales áreas del proyecto: diseño del dron, control de actitud de la aeronave y diseño y desarrollo de la estación de alimentación terrestre que permita mediante un cable el vuelo estacionario de la aeronave. La figura 1 muestra el ciclo de desarrollo iterativo.

Este es similar al modelo de desarrollo de software conocido como modelo en espiral (Boehm, 1988) que conlleva a las siguientes fases:

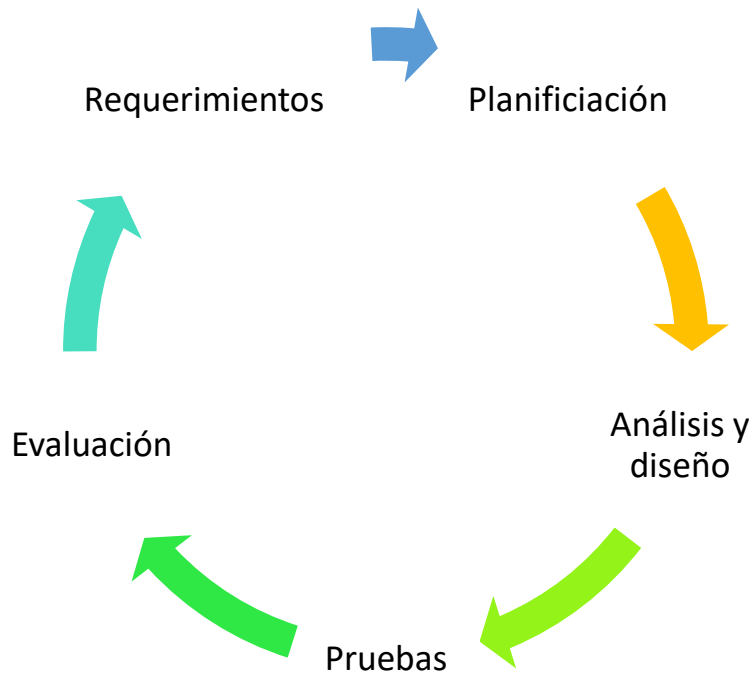
- Plan Inicial: Se establece que el dron debe volar a 5 metros de altura y estar atado a una estación terrestre.
- Requerimientos: Se recopilan y detallan los requisitos específicos del sistema, como la capacidad de carga, duración del vuelo, mecanismos de seguridad y sostenibilidad energética.

- Planificación: Desarrolla un plan de proyecto que incluye la programación de tareas, asignación de recursos y presupuesto. Se identifican hitos clave y se establece un calendario para las fases de desarrollo.
- Análisis y Diseño: En esta fase se realiza el diseño conceptual del dron y la estación terrestre, seleccionando componentes, configuraciones de hardware y software, y se definen las arquitecturas de sistemas y subsistemas.
- Implementación: Comienza la construcción física del dron y la estación terrestre. Se realizan iteraciones de diseño y desarrollo basadas en los resultados de las pruebas.
- Pruebas: Se llevan a cabo pruebas de vuelo y funcionamiento para validar el diseño y la implementación. Esto incluye pruebas de eficiencia energética y rendimiento del vuelo estacionario.
- Evaluación: Se revisan los resultados de las pruebas comparándolos con los requisitos y objetivos iniciales. Se identifican problemas y acciones de mejora.
- Despliegue: Una vez que el dron cumple con todos los requisitos y ha pasado todas las pruebas, se procede al despliegue operativo.
- Repetir: Basándose en la retroalimentación obtenida durante la evaluación y el despliegue, se identifican las mejoras necesarias y se comienza un nuevo ciclo de desarrollo para refinar y optimizar el sistema.

Este proceso se repite iterativamente hasta que el sistema cumpla con todos los requisitos y expectativas de rendimiento.

Figura 1.

Proceso iterativo



Fuente: Completamente generada por el autor, 2023.

2.1. Diseño del Dron

Inicialmente se establecen criterios cualitativos para el rendimiento del dron y la estación terrestre, tales como la duración de vuelo mínima deseada, carga útil, y tiempo de carga.

Tabla 1.

Selección de Componentes

Componente	Selección	Justificación
Frame del Dron (F330)	ABS	Alta resistencia y ligereza.
Motores	Motores sin Escobillas	Eficiencia mejorada y mantenimiento reducido.

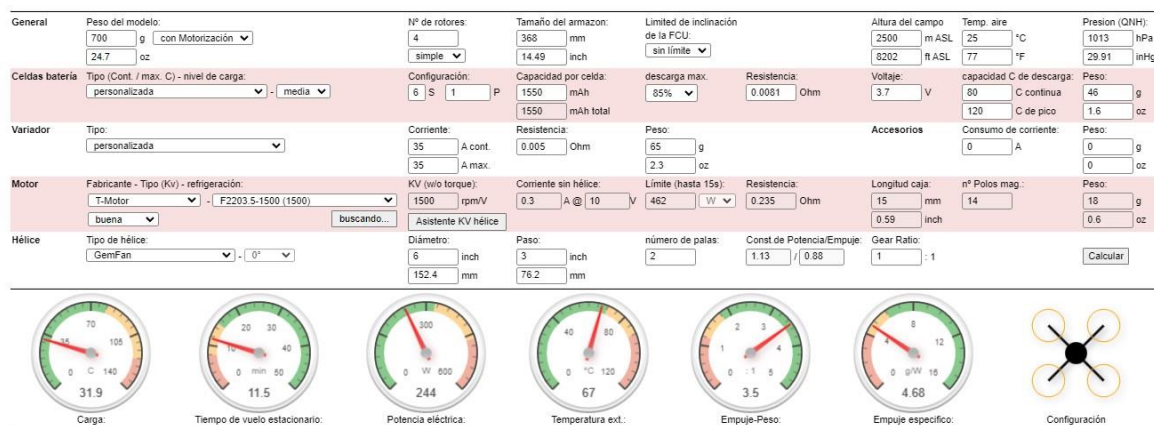
Hélices	Diseño Aerodinámico	Maximiza empuje y minimiza resistencia del aire.
Baterías	Polímero de Litio de Alta Densidad Energética	Mayor duración de vuelo y peso reducido.
Electrónica de Vuelo	Controladora de Vuelo Matek F405	Permite integración de algoritmos open source (Ardupilot)
Estación Terrestre	Estación de Carga Solar	Sostenibilidad y autonomía energética.

Fuente: Completamente generada por el autor, 2023.

El diseño inicial se realiza utilizando la herramienta online eCalc (Figura 2) tomando como base el uso de un *frame* en ABS de referencia F330, La imagen muestra varias métricas divididas en varias categorías, como batería, variador, motor, hélice, y parámetros de vuelo. Estas permiten evaluar el rendimiento, la eficiencia y las características de vuelo del vehículo.

Figura 2.

Cálculos mediante software



Fuente: Adaptado de Autor a partir de eCalc, 2023.

2.1.1. Diseño de la batería de alimentación a bordo.

Para mantener la aeronave en vuelo en caso de ruptura del cable, se utiliza una batería de ion de litio de seis celdas 18650 en serie (6S), con una capacidad de 2200mAh por celda. Esta configuración, bajo un consumo de 14 amperios, proporciona una duración estimada de 9.43 minutos. La batería está equipada con un Sistema de Gestión de Baterías (BMS) para evitar sobrecarga, descarga excesiva y sobrecalentamiento, garantizando la seguridad y eficiencia operativa. En condiciones de alta demanda, el BMS es vital para proteger la batería, optimizar su rendimiento y prolongar su vida útil.

Figura 3.

Ensamble de la batería con BMS



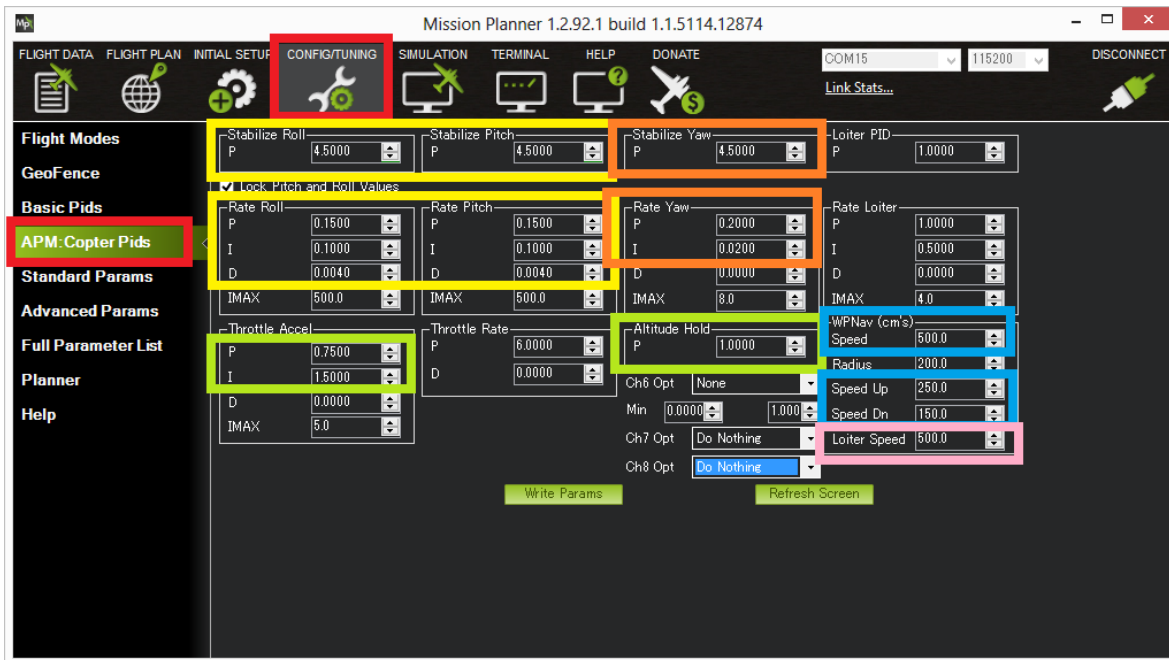
Fuente: Completamente generada por el autor, 2023.

2.2. Control de actitud de la aeronave

Utilizando Mission Planner de ArduPilot (Figura 4), una plataforma de piloto automático de código abierto, se implementan algoritmos de control personalizados para el dron. El proceso incluye la programación de la controladora de vuelo para gestionar y ajustar el modo de vuelo estacionario. De forma iterativa se prueban y se optimizan varios algoritmos para asegurar la estabilidad y eficiencia energética del dron en condiciones controladas.

Figura 4.

Mission Planner – Configuración del control PID

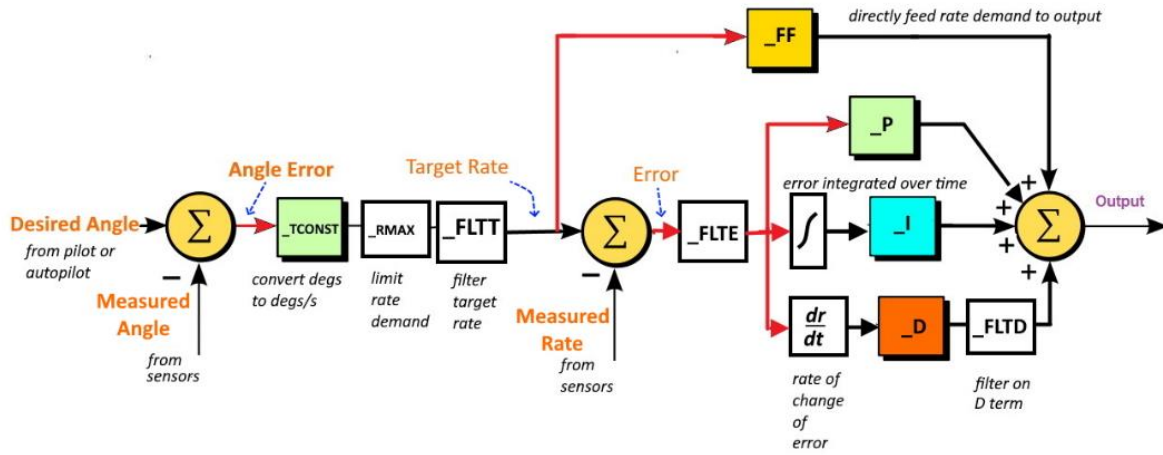


Fuente: Adaptado de Autor a partir de Mission Planner, 2023.

La figura 5 muestra el diagrama de un controlador PID para un UAV, que ajusta la actitud del vehículo. El proceso inicia comparando el ángulo deseado con el medido, generando un error de ángulo que se convierte en una tasa de giro objetivo. Esta tasa se compara con la tasa de giro medida, resultando en un error que se procesa a través de tres componentes: Proporcional (ajusta en función del error), Integral (acumula el error en el tiempo), y Derivativo (responde al cambio de error). Además, un componente de alimentación directa (Feed Forward) puede influir en la salida. Todos estos se suman para producir la señal de control que actúa sobre los actuadores del UAV.

Figura 5.

Diagrama de flujo del controlador PID



Fuente: Tomada literalmente de ardupilot.org, 2023.

1.3. Diseño de la Estación de Alimentación Terrestre

Figura 6.

Estación de alimentación terrestre



Fuente: Completamente generada por el autor, 2023.

La estación (Figura 6) se compone de dos baterías de 12V y 7Ah conectadas en serie, complementadas por dos paneles solares de 5W, y un convertidor DC-DC que ajusta la salida a 22.2V. Se realiza un cálculo detallado para determinar la autonomía del sistema, considerando un consumo de dron de 14 amperios a 22.2V. Los resultados indican una capacidad total de almacenamiento de energía de 336Wh y una producción diaria de energía solar de 50Wh, lo que permite una autonomía aproximada de 1.24 horas.

1.4. Recopilación y Análisis de Datos

Tras el ensamblaje del dron, se procede a la fase de pruebas de vuelo, las cuales se llevan a cabo en un entorno controlado. Inicialmente, se realizan un vuelo estacionario con alimentación con batería, con el objetivo de establecer una línea base del comportamiento del dron bajo condiciones normales de operación, se realiza un análisis de correlación de variables mediante el método de Pearson. Esta etapa es crucial para obtener datos de referencia.

Una vez establecida esta línea base, se efectúa un vuelo estacionario pero esta vez con alimentación por cable (figura 7). Este paso es fundamental para evaluar el impacto de la alimentación por cable en el rendimiento y la autonomía del dron. La comparación detallada entre los resultados de ambas series de pruebas permite determinar cómo la alimentación por cable influye en las capacidades operativas del dron.

En el proceso de evaluación, se lleva a cabo la recopilación de datos que incluye el consumo de energía, la velocidad del viento, y el análisis detallado del comportamiento dinámico del dron. Para capturar estos datos, se emplea un módulo de telemetría, el cual permite registrar y monitorear los parámetros de vuelo en tiempo real, ofreciendo una visión completa y detallada del rendimiento del dron bajo diferentes condiciones. Además, se efectúa un análisis comparativo entre dos escenarios de vuelo distintos: uno en el que el dron opera alimentado por una batería, y otro en el que se utiliza una estación terrestre como fuente de energía. Este análisis comparativo permite entender las

ventajas y limitaciones de cada método de alimentación en términos de eficiencia energética, capacidad de respuesta y autonomía de vuelo.

Figura 7.

Vuelo estacionario con cable.



Fuente: Completamente generada por el autor, 2023.

RESULTADOS

El análisis inicial de los resultados del vuelo revela un cambio brusco y notable en la altura del dron. Este fenómeno se atribuye al mecanismo de control de altura actual, que se basa en un barómetro integrado en la controladora de vuelo. El barómetro, aunque preciso en ciertos aspectos, puede ser susceptible a fluctuaciones ambientales, lo que resulta en variaciones imprevistas en la altura del dron.

Para abordar este problema y mejorar la precisión en el control de altura, se introduce una modificación significativa en la arquitectura del sistema de vuelo. Se integra un sensor ultrasónico (figura 8), conocido por su alta precisión y confiabilidad en la medición de distancias cortas. Esta tecnología ultrasónica es capaz de proporcionar una lectura

más estable y exacta de la altura, al medir la distancia entre el dron y la superficie terrestre de manera directa.

Figura 8.

Sensor ultrasónico US100



Fuente: Tomada literalmente de <https://www.adafruit.com/product/4019>

Tras la incorporación del sensor ultrasónico, se realiza una serie de pruebas de vuelo para evaluar su impacto en la estabilidad de la altura. Los resultados de estas pruebas son notablemente positivos. Se observa que el dron mantiene una altura mucho más constante y controlada, evidenciando una mejora sustancial en comparación con los vuelos anteriores. Este cambio demuestra la eficacia del sensor ultrasónico en la corrección de las variaciones de altura y resalta su potencial para mejorar significativamente el rendimiento y la confiabilidad del dron en el vuelo.

3.1. Vuelo alimentado por batería

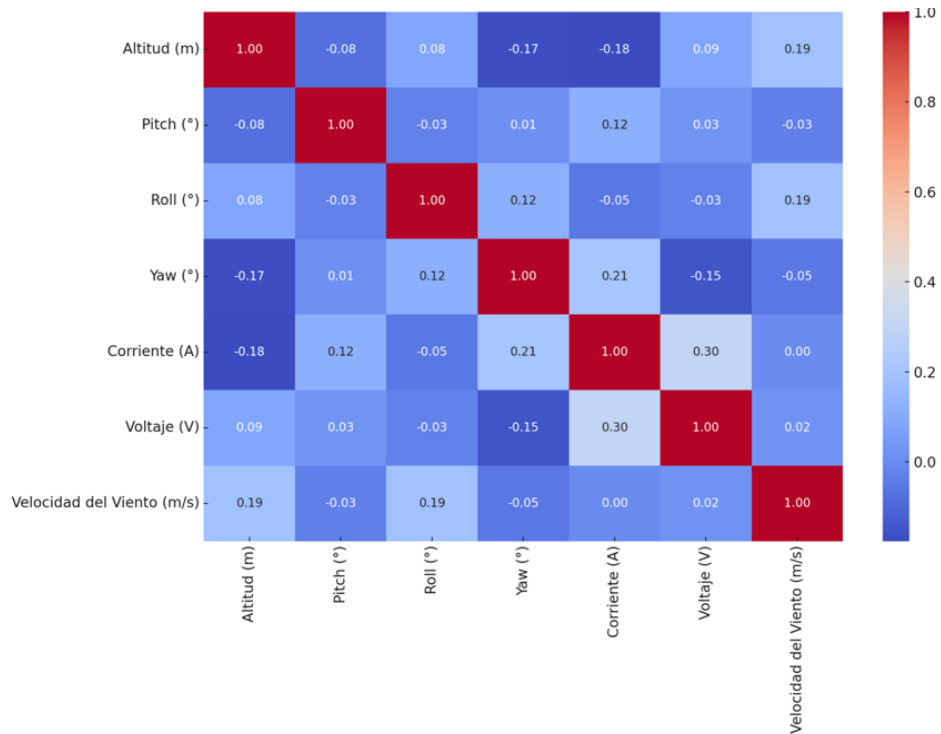
Se realiza un vuelo de prueba con un dron alimentado por una batería de seis celdas (6S) y 1500mAh de capacidad. Este vuelo, que tiene una duración de 8 minutos, se efectúa a una altura promedio de 5 metros, acorde con la autonomía que ofrece la batería. Durante el vuelo, se recopilan 60 muestras de datos a través de un registro de telemetría, incluyendo información sobre altitud, ángulos de inclinación (*pitch*), balanceo (*roll*), guiñada (*yaw*), corriente, voltaje y velocidad del viento. Posteriormente, se realiza

un análisis de correlación (figura 9) para obtener una visión detallada de la interacción entre estas variables, lo que permite descubrir hallazgos significativos:

- Corriente y Voltaje: Existe una correlación negativa moderada entre la corriente y el voltaje (-0.49). Esto sugiere que a medida que el voltaje de la batería disminuye, el dron tiende a consumir más corriente. Esta relación es común en dispositivos eléctricos, donde una disminución del voltaje puede llevar a un aumento en el consumo de corriente para mantener el rendimiento.
- Altitud y Velocidad del Viento: La correlación entre la altitud y la velocidad del viento es baja (0.04), lo que indica que, en este conjunto de datos, la altitud del dron no tiene un impacto significativo en la velocidad del viento que experimenta.
- *Pitch, Roll y Yaw*: Estos ángulos tienen correlaciones muy bajas entre sí (varían entre -0.09 y 0.11), lo que sugiere que las maniobras realizadas en una dirección (por ejemplo, inclinación frontal/*pitch*) no afectan significativamente las orientaciones en otras direcciones (lateral/*roll*, orientación/*yaw*).
- Corriente y Velocidad del Viento: La correlación entre la corriente y la velocidad del viento es baja (-0.11), indicando que no hay una relación fuerte entre estas dos variables en el conjunto de datos proporcionado.
- Altitud y Corriente: La correlación entre la altitud y la corriente es prácticamente inexistente (-0.01), lo que sugiere que la altura a la que vuela el dron no afecta significativamente su consumo de corriente en este conjunto de datos.

Figura 9.

Matriz de correlación de las variables de registro de telemetría, vuelo con batería



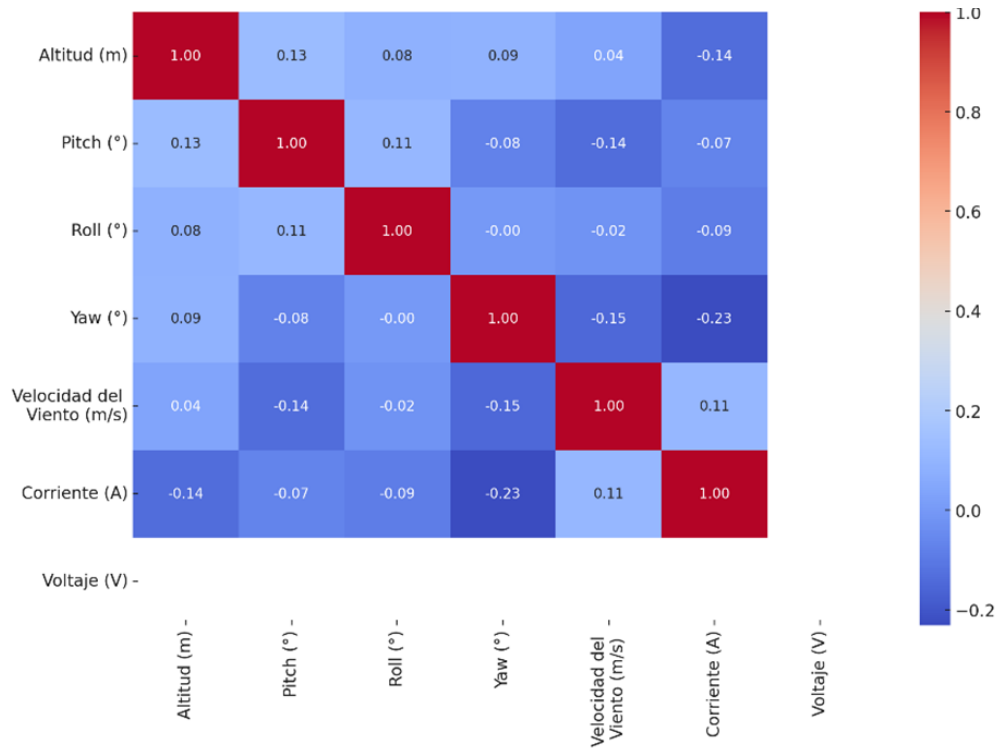
Fuente: Adaptado de Autor a partir de Python, 2023

3.2. Vuelo alimentado por cable con estación terrestre híbrida

Se realiza un vuelo de prueba con un dron alimentado por cable con estación terrestre híbrida con un suministro de 22.2 Voltios constantes. Este vuelo, que tiene una duración de 60 minutos aproximadamente, se efectúa a una altura promedio de 5 metros, acorde con la autonomía que ofrece la estación terrestre. Durante el vuelo, se recopilan 60 muestras de datos a través de un registro de telemetría, incluyendo información sobre altitud, ángulos de inclinación (pitch), balanceo (roll), guiñada (yaw), corriente, voltaje y velocidad del viento. Posteriormente, se realiza un análisis de correlación (figura 10) para obtener una visión detallada de la interacción entre estas variables, lo que permite descubrir hallazgos significativos:

Figura 10.

Matriz de correlación de las variables de registro de telemetría, vuelo con estación terrestre



Fuente: Adaptado de Autor a partir de Python, 2023

- Corriente y Voltaje: La correlación entre la corriente y el voltaje es baja (-0.08), lo que indica una relación débil entre estas dos variables en este conjunto de datos. A diferencia del primer dataset, no hay una correlación negativa significativa, lo que sugiere que el consumo de corriente no aumenta necesariamente a medida que el voltaje disminuye.
- Altitud y Velocidad del Viento: Hay una correlación moderada entre la altitud y la velocidad del viento (0.04). Esto sugiere que, a mayor altitud, el dron podría experimentar mayores velocidades de viento, aunque la correlación no es lo suficientemente fuerte como para afirmar una relación directa.

- *Pitch, Roll y Yaw*: Las correlaciones entre estos ángulos son generalmente bajas, lo que indica que los cambios en uno no están fuertemente relacionados con los cambios en los otros. Esto es consistente en el vuelo con batería.
- Corriente y Velocidad del Viento: Existe una correlación negativa baja entre la corriente y la velocidad del viento (-0.32), lo que podría indicar que el dron consume menos corriente en condiciones de viento más fuerte. Sin embargo, esta correlación no es lo suficientemente fuerte como para sacar conclusiones definitivas.
- Altitud y Corriente: La correlación entre la altitud y la corriente es casi nula (-0.03), lo que sugiere que, en este conjunto de datos, la altitud no tiene un impacto significativo en el consumo de corriente del dron.

Al analizar las matrices de correlación de dos vuelos distintos, se identifican similitudes y diferencias notables en las interacciones entre variables. En ambos casos, las correlaciones entre los ángulos de Pitch, Roll y Yaw son generalmente bajas, indicando que operan de manera relativamente independiente. Además, existe una correlación baja o inexistente entre la altitud y la corriente, lo cual señala que la altura de vuelo del dron no afecta de manera significativa su consumo de corriente.

Por otro lado, se observa una correlación moderada y positiva entre corriente y voltaje en el vuelo que utiliza batería, mientras que, en el vuelo con conexión a una estación terrestre por cable, esta correlación es prácticamente nula. Este contraste podría reflejar diferencias en la eficiencia energética del dron bajo distintas condiciones de vuelo. Adicionalmente, en el vuelo con batería, la correlación entre altitud y velocidad del viento es baja, en comparación con una correlación moderada en el vuelo conectado a la estación terrestre. Esto implica que, en este último escenario, la altitud podría influir más en la velocidad del viento que experimenta el dron.

En este contexto, los estudios de (Sujito et al., 2023) enfocados en la eficiencia energética de cuadricópteros, y el trabajo de Chang & Hung, 2021, sobre un hexacóptero de larga

duración, ofrecen aportes relevantes. Sujito y colaboradores analizan variables como la distancia y el tiempo de vuelo, junto con el consumo energético total, lo que complementa la comprensión de la eficiencia energética en diferentes modalidades de vuelo. Por otro lado, el diseño innovador de Chang & Hung, permite operaciones extendidas de un hexacóptero, resalta la importancia de alternativas de alimentación, como la conexión terrestre, para mejorar significativamente la duración del vuelo. Este enfoque es especialmente relevante al considerar la correlación entre altitud y velocidad del viento en diferentes configuraciones de drones, ampliando así la comprensión de las dinámicas de vuelo en condiciones variadas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran una mejora significativa en la eficiencia energética y la autonomía de vuelo del dron gracias a la estación de energía híbrida y los algoritmos de control avanzados. La capacidad del dron para mantener un vuelo estacionario prolongado, alimentado a través de un cable desde una estación terrestre, supera significativamente las limitaciones de los drones convencionales que dependen de baterías internas.

Los ensayos realizados en diferentes condiciones ambientales muestran que el dron es capaz de mantener una estabilidad de vuelo superior. La inclusión de un sensor ultrasónico y la optimización de algoritmos de control mejoraron la precisión en el control de altura, lo cual es crucial para operaciones de monitoreo y vigilancia. Adicionalmente, el dron desarrollado demostró ser adaptable a una variedad de condiciones y requerimientos operativos. Esto sugiere su potencial para aplicaciones en campos como la agricultura, la inspección de infraestructuras y la vigilancia, especialmente en tareas que requieren largos periodos de operación.

De esta forma, este proyecto ha contribuido significativamente al campo de los UAVs, abordando eficazmente la limitación clave de la autonomía de vuelo. La combinación de un dron cautivo con una estación de energía híbrida representa un avance importante en

la tecnología de drones, extendiendo sus capacidades operativas y abriendo nuevas posibilidades para su uso en diversas aplicaciones. Los hallazgos y metodologías aplicadas en este estudio no solo demuestran la viabilidad de los drones atados en aplicaciones prácticas, sino que también sientan las bases para futuras innovaciones en este campo. La adaptabilidad, eficiencia y estabilidad mejoradas del sistema propuesto ofrecen un punto de partida prometedor para el desarrollo de soluciones más avanzadas y específicas para diferentes necesidades y desafíos operativos.

Por otra parte, se evidencian limitaciones como la dependencia del dron a la estación terrestre, lo que podría restringir su movilidad en ciertas aplicaciones. Además, la gestión de la tensión del cable en condiciones de viento fuerte aún presenta desafíos.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones pueden enfocarse en mejorar la movilidad del dron a pesar de su conexión a la estación terrestre, así como en el desarrollo de sistemas de gestión de cable más avanzados. También sería beneficioso explorar la integración de tecnologías de inteligencia artificial para optimizar el control y la eficiencia energética del dron.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boehm, B. W. (1988). A spiral model of software development and enhancement. *Computer*, 21(5), 61–72. <https://doi.org/10.1109/2.59>

Bongermينو, E., Mastrococco, F., Tomaselli, M., Monopoli, V. G., & Naso, D. (2017). Model and energy management system for a parallel hybrid electric unmanned aerial vehicle. *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1868–1873. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001534>

Boukoberine, M. N., Zhou, Z., & Benbouzid, M. (2019). Power Supply Architectures for Drones - A Review. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5826–5831. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927702>

Chang, K.-H., & Hung, S.-K. (2021a). Design and Implementation of a Tether-Powered Hexacopter for Long Endurance Missions. *Applied Sciences*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/app112411887>

- Chang, K.-H., & Hung, S.-K. (2021b). Design and Implementation of a Tether-Powered Hexacopter for Long Endurance Missions. *Applied Sciences*, 11(24), 11887. <https://doi.org/10.3390/app112411887>
- Elistair. (2020). *Seen on TV - The City of Medellin, Colombia, used tethered drones to help securing crowd gatherings.* <https://www.youtube.com/watch?v=o6OHHmao8yM>.
- Fagiano, L. (2017). Systems of Tethered Multicopters: Modeling and Control Design. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 4610–4615. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.653>
- Humann, J., Equi, M., Link, N., & Latorre-Suarez, P. (2023). Multiple UAVs on a shared tether: Use cases, modeling, and probabilistic path planning. *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*. <https://doi.org/10.1177/15485129231185588>
- Kiribayashi, S., Ashizawa, J., & Nagatani, K. (2015). Modeling and design of tether powered multicopter. *2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2015.7443016>
- Kiribayashi, S., Yakushigawa, K., & Nagatani, K. (2018). *Design and Development of Tether-Powered Multirotor Micro Unmanned Aerial Vehicle System for Remote-Controlled Construction Machine* (pp. 637–648). https://doi.org/10.1007/978-3-319-67361-5_41
- Marques, M. N., Magalhães, S. A., Dos Santos, F. N., & Mendonça, H. S. (2023). Tethered Unmanned Aerial Vehicles—A Systematic Review. *Robotics*, 12(4), 117. <https://doi.org/10.3390/robotics12040117>
- Meng, Y., Song, J., Lan, Y., Mei, G., Liang, Z., & Han, Y. (2019). Harvest aids efficacy applied by unmanned aerial vehicles on cotton crop. *Industrial Crops and Products*, 140, 111645. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111645>
- Montanya, J., Lopez, J. A., Fontanes, P., Urbani, M., van der Velde, O., & Romero, D. (2018). Using tethered drones to investigate ESD in wind turbine blades during fair and thunderstorm weather. *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503283>
- Motlagh, N. H., Bagaa, M., & Taleb, T. (2017). UAV-Based IoT Platform: A Crowd Surveillance Use Case. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), 128–134. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600587CM>
- Muttin, F. (2011). Umbilical deployment modeling for tethered UAV detecting oil pollution from ship. *Applied Ocean Research*, 33(4), 332–343. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2011.06.004>

- Nikolic, J., Burri, M., Rehder, J., Leutenegger, S., Huerzeler, C., & Siegwart, R. (2013). A UAV system for inspection of industrial facilities. *2013 IEEE Aerospace Conference*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6496959>
- Royce, W. W. (1970). *Managing the Development of Large Software Systems. Proceedings of IEEE WESCON.*
- Savnik, P. (2015). *Tether Control for Unmanned Aerial Vehicle - Creating a Platform for Tether Control of UAV.*
- Selim, M. Y., & Kamal, A. E. (2018). Post-Disaster 4G/5G Network Rehabilitation Using Drones: Solving Battery and Backhaul Issues. *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2018.8644135>
- Sujito, Lestari, D., Sendari, S., Faiz, M. R., Wang, H.-Y., Prasanta, M. R., & Sihombing, Y. P. (2023). *Quadcopter drone design and battery power consumption analysis against flying time and distance.* 030007. <https://doi.org/10.1063/5.0120973>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zikou, L., Papachristos, C., & Tzes, A. (2015). The Power-over-Tether system for powering small UAVs: Tethering-line tension control synthesis. *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 681–687. <https://doi.org/10.1109/MED.2015.7158825>