

Estudio comparativo de sensores durante navegación por waypoints en cuadricóptero Comparative study of sensors during waypoint navigation in quadcopter

M. Torres-Rivera ^{a,*}, I. Olvera-Blas ^a, A. Ramon-Mendoza ^a, A. Olivera-Barcenas ^a, G. Ramirez-Villa ^a,
I. Martin-Felipe ^a

^aUniversidad Aeronáutica en Querétaro, 22154, Colón, Querétaro, México.

Resumen

En vuelos con GPS la posición del UAV sobre la tierra es obtenida directamente por el receptor lo que facilita la navegación autónoma. Al no contar con una señal adecuada de este sensor, principalmente en interiores, es necesario estimar la velocidad, distancia y orientación con otro tipo de dispositivos como los sistemas de visión que suelen requerir un alto procesamiento computacional, o los sistemas inerciales en fusión sensorial con sensores de flujo óptico. A partir de lo anterior, se propone un análisis comparativo entre las mediciones obtenidas por el GPS, las lecturas de los sensores inerciales y del sensor de flujo óptico, durante el seguimiento autónomo de waypoints, sentando con ello las bases para la implementación de un sistema de navegación que utilice fusión sensorial y estimación de pose del cuadricóptero cuando no es posible el uso del GPS.

Palabras Clave: Flujo óptico, cuadricóptero, sensores inerciales, navegación autónoma, waypoints.

Abstract

In flights with GPS the position of the UAV on the ground is obtained directly by the receiver which facilitates autonomous navigation. Not having an adequate signal of this sensor, mainly indoors, it is necessary to estimate the speed, distance and orientation with other types of devices such as vision systems that usually require high computational processing, or inertial systems in sensor fusion with optical flow sensors. Based on the above, a comparative analysis is proposed between the measurements obtained by the GPS, inertial sensor and optical flow sensor readings, during autonomous way-point tracking, thereby, laying the foundations for the implementation of a navigation system that uses sensor fusion and estimation of quadcopter position when GPS use is not possible.

Keywords: Optical flow, quadcopter, inertial sensors, autonomous navigation, waypoints.

1. Introducción

En un mundo en constante evolución tecnológica, los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs) se han convertido en protagonistas indiscutibles de la innovación y la exploración, convirtiéndose en herramientas esenciales en una amplia gama de aplicaciones. Estos sistemas aéreos, también denominados Unmanned Aerial Vehicles, han trascendido la aviación tradicional al ser operados sin la necesidad de un piloto a bordo.

A medida que la tecnología ha avanzado, se ha logrado una progresiva autonomía en los UAVs, permitiendo que estos sistemas sean guiados de manera autónoma mediante la integración de unidades de procesamiento avanzado, sensores incorporados de alta precisión y una conexión de comunicación. Gracias a

este desarrollo, un UAV es capaz de llevar a cabo una amplia gama de tareas, desde la observación y recopilación de datos hasta la ejecución de misiones especializadas en entornos inaccesibles o peligrosos para los humanos.

Debido a la autonomía de los UAVs, su precisión en el posicionamiento se ha convertido en un factor crítico durante su operación. La capacidad de estos dispositivos para determinar su ubicación con exactitud es esencial para garantizar tanto la seguridad como la efectividad de las misiones. Para lograr esta precisión, los UAVs emplean diversas tecnologías que abarcan sistemas de posicionamiento global (GPS) hasta sensores inerciales y tecnologías ópticas.

Los vuelos con GPS son los más comunes dentro de los vehículos no tripulados, la capacidad de obtener la posición

* Autor para correspondencia: moises.torres@unaq.mx

Correo electrónico: moises.torres@unaq.mx (Moisés Torres Rivera), 5217@soyunaq.mx (Iván Enrique Olvera Blas), 7356@soyunaq.mx (Alejandra Ramón Mendoza), 7343@soyunaq.mx (Ana Sofía Olivera Bárcenas), goretti.ramirez@unaq.mx (Goretti Ramírez Villa), 7418@soyunaq.mx (Rosa Isela Martín Felipe).

Historial del manuscrito: recibido el 30/06/2023, última versión-revisada recibida el 10/09/2023, aceptado el 04/09/2023, publicado el 30/11/2023. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial4.11402>



exacta de un UAV directamente a través de su receptor ha revolucionado la navegación autónoma. Sin embargo, esta tecnología presenta limitaciones cuando se opera en interiores o en áreas con señales de GPS inestables o débiles. En estas situaciones, es necesario recurrir a otros dispositivos para estimar la velocidad, distancia y orientación del cuadricóptero. Algunas soluciones incluyen sistemas de visión que requieren un procesamiento computacional o sistemas inerciales.

Para garantizar una mayor confiabilidad y redundancia, muchos sistemas de UAVs implementan una combinación de tecnologías de posicionamiento. Al integrar múltiples sensores y fuentes de información, como el GPS junto con sensores inerciales y sistemas de flujo óptico, se puede mejorar la precisión y mitigar los efectos de posibles fallas en un sensor en particular. Esta redundancia en la información de posicionamiento contribuye significativamente a la seguridad operativa y permite que los UAVs sean adaptables.

En busca de superar las limitaciones de posicionamiento, este artículo propone un análisis comparativo entre las mediciones obtenidas por el GPS, los sensores inerciales y el sensor de flujo óptico durante el seguimiento autónomo de waypoints. La integración y comparación de diferentes fuentes de datos permitirán obtener una visión más completa y precisa de la posición del UAV, mejorando así la seguridad y confiabilidad de la navegación autónoma en cualquier situación en las que el uso del GPS no es factible.

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Sensor de flujo óptico

Un sensor de flujo óptico es un dispositivo esencial en la percepción visual y el seguimiento de movimiento. Utiliza los cambios en la posición de los píxeles en imágenes sucesivas para determinar con mayor precisión tanto la velocidad como la dirección del movimiento de un objeto.

Este dispositivo mide el grado de movimiento o desplazamiento en un plano bidimensional, recurriendo a técnicas de medición respaldadas por el procesamiento de imágenes. La medición de flujo óptico se efectúa a través del análisis comparativo de secuencias de imágenes capturadas. Esta comparación busca calcular tanto la dirección como la magnitud del movimiento y traducirlo en desplazamiento en los ejes X y Y. (Tresánchez Ribes, 2011)

Su funcionalidad se basa en algoritmos de procesamiento de imágenes avanzados, lo que lo hace fundamental en la comprensión y el análisis en tiempo real del movimiento. (Beauchemin y Barron, 1995)

Los algoritmos de flujo óptico buscan detectar el movimiento generado en distintas áreas de la imagen, lo que permite comprender la relación entre la posición de los píxeles y la trayectoria de los objetos en movimiento.

Esta tecnología ha encontrado aplicaciones en campos como la robótica móvil y en los UAVs, permitiendo el posicionamiento preciso y la detección de obstáculos.



Figura 1: Sensor de flujo óptico.

1.1.2. GPS

El GPS es un sistema de radionavegación basado en el espacio que proporciona servicios de posicionamiento, navegación y cronometría a usuarios civiles en todo el mundo. Consiste en una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra, estaciones terrestres de seguimiento y control, y receptores del GPS utilizados por los usuarios. Los satélites transmiten señales que son recibidas e identificadas por los receptores del GPS, permitiéndoles determinar su ubicación tridimensional (latitud, longitud y altitud) y la hora precisa en cualquier lugar y condición atmosférica. (Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación, y Cronometría por Satélite, 2023)

Además de su utilidad en la navegación y la localización, el GPS tiene aplicaciones en una amplia variedad de sectores y actividades. En la agricultura, los agricultores utilizan el GPS para optimizar la siembra y el riego, garantizando un uso eficiente de los recursos y mejorando la productividad. En la topografía y la geología, el GPS se utiliza para realizar mediciones precisas de terrenos, mapeo de áreas y seguimiento de movimientos tectónicos. En la figura 2 se aprecia el sensor GPS utilizado en el cuadricóptero.



Figura 2: Sensor GPS.

1.1.3. Sensores Inerciales

Un sensor inercial, también conocido como IMU (Unidad de Medición Inercial), es un componente capaz de obtener la posición, orientación y velocidad del dispositivo en el que se utiliza. Está compuesto por tres tipos de sensores y magnetómetros. Cada uno de estos sensores cumple una función específica para lograr un resultado conjunto. (Ahmad *et al.*, 2013)

- Giroscopio, basado en el principio de conservación del momento angular, mide la velocidad angular de rotación alrededor de los ejes del dispositivo. Proporciona información sobre los cambios en la orientación y la velocidad angular del dispositivo.
- Acelerómetro, mide la aceleración lineal en diferentes direcciones. Al integrar la aceleración en el tiempo, se pue-

de obtener información sobre la velocidad y la posición lineal del dispositivo.

- **Magnetómetro**, mide el campo magnético terrestre y proporciona información sobre la orientación del dispositivo con respecto al norte magnético.

1.1.4. PX4

El sistema de piloto automático PX4, diseñado para vehículos aéreos no tripulados, es un software de código abierto que proporciona un amplio conjunto de herramientas para vuelos autónomos. (PX4 Autopilot, 2023)

Una de las características más importantes de PX4 es su capacidad para fusionar y sincronizar los datos de los diferentes sensores en un horizonte de tiempo común para obtener una estimación actualizada y precisa del estado del UAV. Esto se logra mediante el uso de un estimador de estado (EKF) que utiliza los datos de los sensores (magnetómetro, sensor de flujo óptico, GPS) para estimar la orientación, la velocidad, la posición y otros estados del UAV. (PX4 Autopilot, 2019)

El software PX4 puede ser instalado en el controlador de vuelo Pixhawk, el cual está integrado por un microcontrolador STM32F103, acelerómetro, giroscopio, barómetro y conectividad para diversos sensores como el sensor de flujo óptico y el GPS. En la figura 3 se puede apreciar el controlador de vuelo Pixhawk utilizado



Figura 3: Pixhawk 2.4.8.

1.1.5. EKF

El estimador de estado, es un algoritmo de filtrado utilizado para estimar el estado de un sistema dinámico a partir de mediciones ruidosas. En este caso se utiliza para estimar la orientación, la velocidad, la posición y otros estados del vehículo, a partir de los datos de los sensores. Es una extensión del filtro de Kalman clásico y se utiliza para sistemas no lineales y no gaussianos, como los sistemas dinámicos que se encuentran en los UAVs. (Feng y Fangchao, 2016)

El EKF se ejecuta en tiempo real, ya que también es iterativo, es utilizado para actualizar la estimación del estado futuro del sistema en cada iteración. Una estimación precisa del estado del UAV es esencial para un vuelo estable y seguro. También utiliza una matriz de covarianza para modelar la incertidumbre en la estimación del estado del sistema. El esquema general del EKF en PX4 puede ser apreciado en la figura 4.

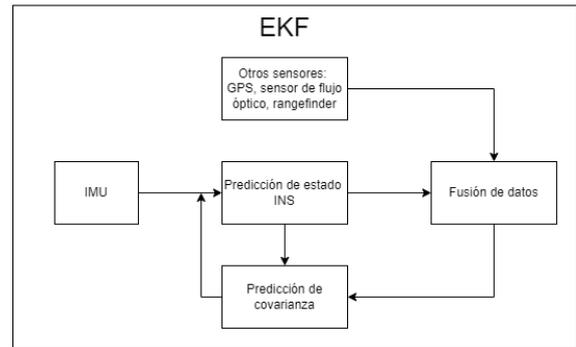


Figura 4: Procesamiento de datos de sensores.

1.1.6. QGroundControl

Es una interfaz de usuario gráfica que permite a los usuarios controlar y monitorear el dron durante el vuelo. QGroundControl proporciona una amplia variedad de herramientas para la planificación de misiones, la configuración del UAV y la visualización de datos de telemetría en tiempo real. (DroneCode, 2023)

Durante el vuelo, QGroundControl proporciona una visualización en tiempo real de los datos de telemetría del dron, como la posición, la velocidad, la altitud y la orientación. Los usuarios pueden utilizar esta información para monitorear el estado del dron y tomar decisiones informadas durante el vuelo.

2. Metodología

La presente sección describe la metodología empleada para el desarrollo de este proyecto, en el cual se destaca la arquitectura del dron, selección de componentes, configuraciones, pruebas de vuelo y análisis de datos.

El primer paso para el desarrollo del proyecto consistió en seleccionar la arquitectura del dron para la aplicación y el estudio de la comparativa de sensores.

La selección de sensores se realizó considerando las pruebas planificadas para analizar mediciones obtenidas por el GPS, sensores inerciales y el sensor de flujo óptico durante el seguimiento autónomo de waypoints. A partir de esta selección, el proceso metodológico abarcó varias etapas cruciales. La investigación inicial sirvió como punto de partida, seguida de la selección precisa de componentes que satisficieran las necesidades específicas de la misión del UAV. Luego, se definió la arquitectura y conexiones de los elementos; posteriormente se configuraron los dispositivos para adquirir y procesar datos relevantes.

El diseño de pruebas fue fundamental, abordando tanto vuelos pilotados manualmente como vuelos autónomos. Estas pruebas permitieron recopilar datos bajo diferentes escenarios y condiciones, proporcionando una base para el análisis posterior. Los resultados obtenidos de las pruebas fueron sometidos a un análisis exhaustivo con el objetivo de comprender mejor el rendimiento del dron, evaluar la fiabilidad de los datos obtenidos por los sensores y ofrecer una perspectiva más amplia acerca del uso de técnicas de fusión sensorial.

Para la evaluación de los sensores se utilizó el MAE (Mean Absolute Error) la cual es una práctica común en la evaluación de modelos predictivos y estimaciones. Permite compren-

der cuánto se desvían las predicciones del valor real en promedio, lo que facilita la evaluación de la precisión de diferentes sensores.

Es relevante destacar que la comparativa propuesta por el proyecto se centra en garantizar vuelos en interiores sin depender del GPS, lo que implica un desafío significativo para la navegación y el posicionamiento. El proceso metodológico delineado en esta sección sirvió como guía para el desarrollo, pruebas y evaluación de la arquitectura propuesta del UAV, culminando en la obtención de resultados valiosos y un mayor entendimiento de su funcionamiento y capacidad.

3. Desarrollo

3.1. Arquitectura del Dron

La arquitectura del UAV presentado, se caracteriza por la flexibilidad del diseño para ser viable en distintas aplicaciones. El dron combina componentes comerciales de reconocidos fabricantes para ofrecer un vuelo estable y seguro. Su estructura física está fabricada con fibra de vidrio y poliamida de nylon, materiales ligeros y resistentes, lo que proporciona una sólida base para su funcionamiento.

El UAV está equipado con una controladora de vuelo del fabricante Pixhawk, la cual es una placa electrónica que tiene un rol crucial en el procesamiento y control de diversos aspectos del vuelo. Esta controladora se destaca por su alta confiabilidad y ofrece características y funciones adicionales para el control del UAV. Además, la Pixhawk está conectada a varios sensores, incluyendo un barómetro, un sensor de flujo óptico y sensores inerciales, que permiten obtener una visión más completa y precisa del entorno y del estado del dron durante el vuelo pilotado y autónomo.

El dron también cuenta con un módulo de alimentación que desempeña un papel esencial al regular y distribuir la energía de la batería a los diferentes componentes, asegurando un suministro estable y eficiente de energía en todo momento.



Figura 5: Dron F450.

3.1.1. Conectividad y sensores externos

El UAV cuenta con una serie de componentes externos que permiten una mayor conectividad y funcionalidad. En particular, se utilizan Controladores Electrónicos de Velocidad (ESC, por sus siglas en inglés), componentes electrónicos encargados

de regular la velocidad y dirección de los motores, lo que proporciona un control de los motores durante el vuelo.

Además, el dron está equipado con un receptor de control remoto que permite al piloto enviar comandos desde el controlador aéreo, lo que posibilita un control manual y la ejecución de maniobras específicas según las necesidades del piloto.

En cuanto a los sensores externos, el dron está equipado con un sensor de flujo óptico con la cámara apuntando hacia el suelo para medir el cambio de píxeles, cuenta con un GPS conectado por I2C y adicionalmente con un sensor óptico para medir la altitud del UAV con mayor precisión,

Por último, el dron cuenta con un sistema de telemetría que permite la transmisión de datos en tiempo real entre el dron y la estación de control terrestre. Este sistema de telemetría es esencial para el monitoreo y control durante el vuelo, y permite la visualización de datos como la posición, velocidad, altitud y estado de la batería. En la figura 6 se aprecian las conexiones mencionadas.

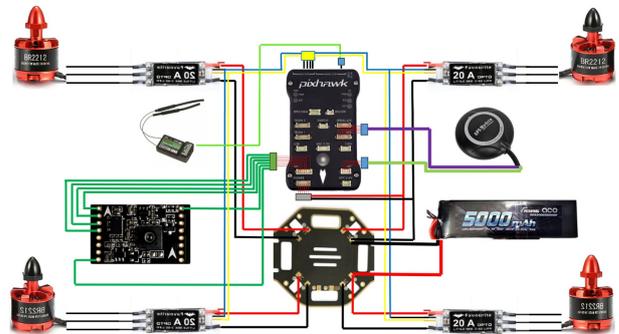


Figura 6: Esquema de componentes del UAV.

3.2. Pruebas de vuelo

Continuando con la evaluación exhaustiva del rendimiento de los sensores, se procedió a llevar a cabo una serie de pruebas. El proceso comenzó mediante la interconexión de la Pixhawk con la computadora, lo que posibilitó la configuración y armado del UAV mediante la estación terrena QGroundControl. Después, se verificó la correcta transmisión de datos por parte del sensor, seguido de la confirmación de que estos datos se estaban capturando y almacenando adecuadamente.

Posteriormente, se realizaron pruebas que simulaban vuelos, utilizando el UAV sin las hélices en funcionamiento para evitar el despegue. Estas simulaciones permitieron validar la precisión y confiabilidad de las mediciones en diversos contextos de movimiento.

En una etapa posterior, se llevaron a cabo vuelos de prueba en exteriores. Se establecieron waypoints específicos mediante la plataforma QGroundControl para definir un recorrido preestablecido para el dron, el cual seguirá la trayectoria necesaria para alcanzar dichos waypoints como se observa en la figura 7. Esta metodología permitió al UAV seguir una ruta determinada de manera autónoma y precisa, aprovechando la capacidad del sensor de flujo óptico para medir los cambios en el entorno visual cercano.

A lo largo de estas instancias de prueba, se recopilaban datos esenciales, incluyendo información sobre posición, velocidad, distancia y orientación. Estos datos fueron generados por

cada uno de los sensores bajo investigación en el marco de este artículo.

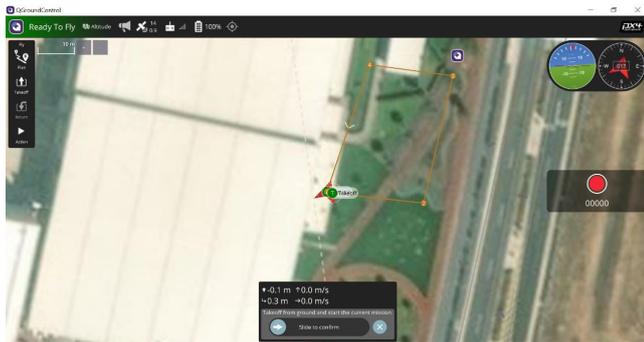


Figura 7: Waypoints establecidos durante pruebas.

3.3. Procesamiento de Datos

Durante las pruebas de vuelo, el UAV generó valiosa información que se almacenó en la tarjeta de memoria de la controladora de vuelo Pixhawk. PX4 almacena estos registros en formato .ulg, proporcionando una representación eficiente y compacta de los datos capturados. Para facilitar el análisis de los datos capturados por los sensores de flujo óptico, GPS y la IMU, se llevó a cabo un proceso de conversión de los archivos .ulg a un formato .csv, este formato es ampliamente reconocido y compatible con herramientas de análisis de datos. La conversión se realizó utilizando el lenguaje de programación Python, permitiendo una automatización eficiente y precisa del proceso.

Una vez que los archivos fueron convertidos y preparados para el análisis, se empleó MATLAB para llevar a cabo un análisis exhaustivo. El cual permitió realizar cálculos complejos y obtener gráficas representativas que facilitaron la comparación de resultados entre los diferentes sensores. Esta etapa de análisis proporcionó una visión más clara de la precisión y coherencia de los datos recopilados por cada sensor.

Dentro de la controladora de vuelo Pixhawk PX4, se encuentra un IMU que ofrece una tasa de muestreo máxima de 8,000 Hz. Sin embargo, para nuestras comparaciones, seleccionamos una tasa de muestreo de 1000 Hz. Esta elección nos proporciona un equilibrio entre precisión y eficiencia en el procesamiento de datos, lo que resulta en respuestas rápidas, mayor estabilidad y navegación precisa. Los datos del sensor de flujo óptico indican que opera a una tasa de muestreo superior a 100 Hz cuando la iluminación ambiente supera los 60 lux. Este sensor desempeña un papel crucial en el seguimiento de movimiento en diversas aplicaciones. Mientras que el GPS opera a una tasa de solo 10 Hz

Aumentar la velocidad de la tasa de muestreo ofrece ventajas notables, mejorando la estabilidad y la capacidad de respuesta en tiempo real en la navegación del UAV. Esto es fundamental para lograr un vuelo seguro y un control preciso en diferentes condiciones. La elección de la tasa de muestreo adecuada es esencial para optimizar el rendimiento de su sistema de vuelo autónomo.

4. Resultados

Para proporcionar una representación más completa y visual de la trayectoria del UAV generada por los waypoints de

la misión autónoma, se elaboró una gráfica que refleja la posición del vehículo en términos de latitud, longitud y altitud. La Figura 8 exhibe esta visualización gráfica, en la cual, se ilustra la trayectoria realizada por el UAV. Adicionalmente, la dimensión vertical del gráfico se emplea para mostrar la altitud, permitiendo así una apreciación completa de la trayectoria en tres dimensiones.

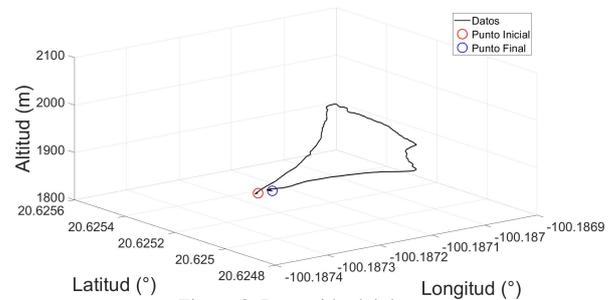


Figura 8: Recorrido del dron.

La Figura 9 y Figura 10 presenta una comparación detallada de las velocidades obtenidas a partir del GPS, IMU y sensor de flujo óptico. Es importante destacar que, debido a las limitaciones del sensor de flujo óptico en la estimación de la velocidad vertical, la comparación en el eje Z se realizó únicamente utilizando las velocidades de la IMU y el GPS lo que se observa en la figura 11.

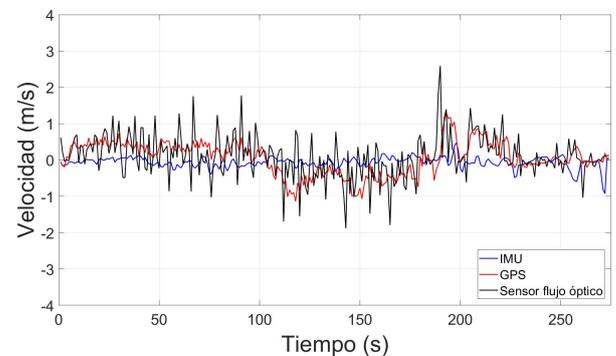


Figura 9: Comparación de velocidades eje X.

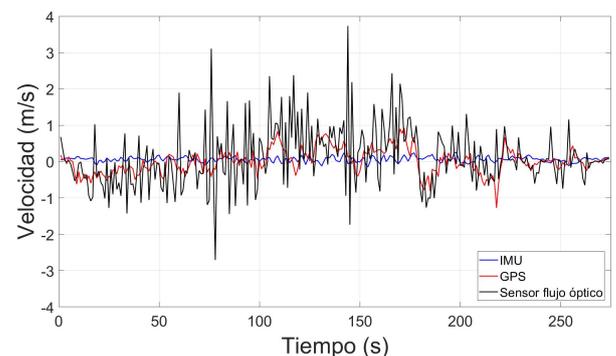


Figura 10: Comparación de velocidades eje Y.

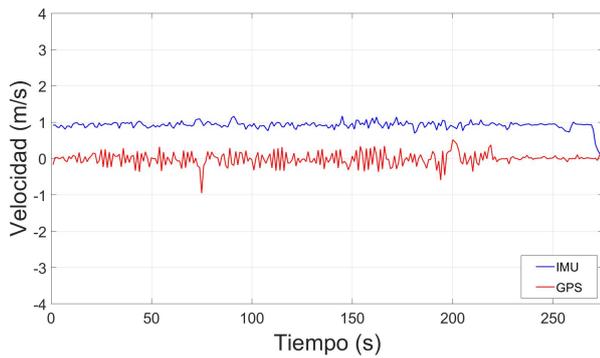


Figura 11: Comparación de velocidades eje Z.

En este estudio, dado que no se dispone de un valor real absoluto para comparar, se utilizaron las velocidades estimadas por el sensor GPS como referencia. Esto se debe a la alta precisión que ofrece el sistema GPS, el cual utiliza una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra para determinar la posición y, por consiguiente, la velocidad, lo que lo convierte en una referencia.

En la Tabla 1, se presenta la métrica error absoluto medio (MAE) de las velocidades obtenidas mediante la IMU y el sensor de flujo óptico en relación al GPS. Como se puede observar, en los ejes X y Y, el MAE se encuentra dentro del rango aceptable, lo que sugiere una coherencia satisfactoria entre las velocidades estimadas por los sensores. Sin embargo, en el eje Z, se observa una variación más amplia de lo deseado. Esto podría atribuirse a la naturaleza específica de las mediciones verticales y las posibles influencias ambientales. La precisión en el eje z puede estar sujeta a una variedad de factores, como cambios en las condiciones atmosféricas y la altitud del vuelo.

Es importante destacar que la estimación precisa de la altitud es una tarea compleja debido a la interacción con la atmósfera y la necesidad de considerar efectos de presión y temperatura.

Tabla 1: Métrica de desempeño

Sensor	X	Y	Z
IMU	0.41068	0.2813	0.82451
Sensor de flujo óptico	0.40097	0.52444	-

Tanto la IMU como el sensor de flujo óptico demuestran una buena precisión en los ejes X y Y, con valores de MAE cercanos a 0.4 m/s en ambos casos. Esto sugiere que ambas tecnologías son capaces de proporcionar estimaciones de velocidad horizontal confiables y consistentes en estas dimensiones. En el eje Z, la IMU muestra un valor de MAE de 0.82451, lo que indica una mayor variación en las estimaciones de velocidad vertical en comparación con los ejes horizontales. Comparando los valores de MAE entre la IMU y el sensor de flujo óptico, se observa que ambos sensores tienen valores de MAE similares en los ejes X y Y, lo que indica un rendimiento comparable en la estimación de velocidades horizontales. La diferencia en el eje Z destaca la importancia de evaluar cuidadosamente el rendimiento de cada sensor en diferentes dimensiones.

5. Conclusiones

La integración de diversos sensores en la determinación de la actitud, posición, rumbo y velocidad del cuadricóptero se revela como un componente esencial para garantizar un vuelo autónomo preciso y confiable en entornos donde la disponibilidad de sistemas de posicionamiento global puede ser limitada o inconsistente. El presente estudio se centró en comparar el desempeño de tres tipos de sensores, a saber: flujo óptico, sensores inerciales y GPS, durante pruebas de vuelo pilotado y autónomo.

La evaluación de los datos recopilados permitió establecer que, de los sensores considerados, el GPS proporcionó una referencia sólida para la navegación, por lo cual se tomó como referencia para la comparativa, en la que se identificó que los otros sensores tuvieron un error absoluto promedio de 0.4 m/s. Si bien este error puede considerarse aceptable en muchas aplicaciones, es crucial recalcar que, para vuelos autónomos en espacios interiores, donde las condiciones y la precisión del GPS pueden ser comprometidas, una mayor precisión en la medición de la velocidad se vuelve fundamental. En cuanto a la diferencia significativa en el eje z puede reducirse considerablemente si se hace uso de sensores ópticos tipo Lidar cuya precisión es más alta que el GPS y la IMU para alturas menores a 5 metros.

Cabe señalar que la comparativa fue realizada tomando como referencia la señal de GPS que aunque tiene una alta precisión de alrededor de 1 metro, existen sistemas de posicionamiento y determinación de actitud como el RTK (Real-Time Kinematic) con precisión de hasta 1 centímetro lo que permitiría evaluar de mejor manera los sensores presentados en este trabajo. Adicionalmente aunque se puede contar con una precisión elevada del GPS, la baja tasa de muestreo en comparación con la alcanzada por el sensor de flujo óptico y la IMU, limita el uso de este sensor para aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida como pueden ser las carreras de drones autónomos.

Los resultados de esta comparativa servirán como línea base para la aplicación futura del dron en entornos interiores sin dependencia del GPS. La eliminación del GPS en espacios cerrados conlleva desafíos particulares que deben abordarse con la utilización de sensores alternativos y la adopción de técnicas de fusión sensorial. La fusión de datos provenientes de múltiples sensores puede potencialmente contrarrestar las limitaciones individuales de cada sensor, permitiendo una mayor precisión y confiabilidad en la estimación de la posición y velocidad del cuadricóptero en entornos sin GPS.

Este estudio comparativo ha proporcionado una visión fundamental de las capacidades y limitaciones de diferentes sensores durante la navegación por waypoints en un cuadricóptero. La búsqueda de soluciones para vuelos autónomos en interiores sin GPS representa un paso significativo hacia la ampliación de las aplicaciones prácticas de esta tecnología, y el enfoque en la fusión sensorial se presenta como un camino prometedor para lograr una navegación precisa y confiable en dichos entornos desafiantes.

Referencias

- Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., y Kasi, V. (2013). Reviews on various inertial measurement unit (imu) sensor applications. *International*

- Journal of Signal Processing Systems*, 1(2):256–262.
- Beauchemin, S. S. y Barron, J. L. (1995). The computation of optical flow. *ACM computing surveys (CSUR)*, 27(3):433–466.
- DroneCode (16 de Julio de 2023). *QGroundControl User Guide*. <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/index.html>.
- Feng, L. y Fangchao, Q. (2016). Research on the hardware structure characteristics and ekf filtering algorithm of the autopilot pixhawk. En *2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, pp. 228–231. IEEE.
- Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación, y Cronometría por Satélite (28 de Junio de 2023). *Sistema de Posicionamiento Global*. <https://www.gps.gov/spanish.php>.
- PX4 Autopilot (2019). PX4 state estimation update - dr. paul riseborough - PX4 developer summit 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=HkYRJJoyBwQ>.
- PX4 Autopilot (28 de Junio de 2023). *Software overview*. <https://px4.io/software/software-overview/>.
- Tresánchez Ribes, M. (2011). Aplicación de sensores de flujo óptico para el desarrollo de nuevos sistemas de medida de bajo coste.