

Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

España - Portugal



0054_AEROGANP_1E

Entregable E.3.3

Cursos de formación. Material docente

Universidade de Vigo



Universidade de Alentejo

UNIVERSIDADE DA CORUÑA



U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

INESCTEC

XUNTA
DE GALICIA



CAG GALICIA
ADICIONAL
CENTRO

CEIIA

itg

gradient

Formación científico-tecnológica para el consorcio y empresas del sector, empleando los pilotos desarrollados

INDICE

1. Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en redes de comunicaciones 3D

1.1 Enlaces Ópticos en espacio libre	3
1.2 Tecnología desarrollada	7
1.3 Conexión con Redes 5G	10

2. Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en monitorización aérea

2.1 Monitorización en exteriores	13
2.2 UAV en interiores	20

3. Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en aterrizajes de emergencia en plataformas marinas

3.1. Introducción	26
3.2 Modelo predictivo del movimiento de artefactos flotantes.....	27
3.3 Tecnología de compensación de movimiento.....	31

ANEXOS

ANEXO I.- Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en monitorización aérea

1. Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en redes de comunicaciones 3D

1.1 Enlaces Ópticos en espacio libre (FSO)

1.1.1 Introducción

La tecnología FSO opera bajo un principio sorprendentemente simple: utiliza la luz, generalmente en el espectro infrarrojo, para transmitir información entre dos puntos a través del espacio libre, como el aire. Es análoga a una conexión de fibra óptica, pero reemplazando el cable físico por la atmósfera como medio de transmisión [1].

Un sistema FSO se compone fundamentalmente de estos elementos:

- **Transceptor Óptico:** Cada extremo del enlace cuenta con un transceptor, que integra un transmisor y un receptor. El transmisor convierte las señales eléctricas de datos en pulsos de luz mediante un diodo láser o un LED de alta potencia.
- **Canal Atmosférico:** La luz viaja en línea de vista directa (Line-of-Sight) a través de la atmósfera hasta el otro extremo.
- **Receptor:** El receptor en el otro transceptor capta los pulsos de luz, los convierte de nuevo en una señal eléctrica y reconstruye los datos originales.

La técnica de modulación más común es la modulación por intensidad o de potencia (On-Off Keying - OOK), donde la presencia de un pulso de luz de alta potencia representa un "1" lógico y una potencia baja o nula representa un "0" lógico. Este método es robusto y eficiente para las altas velocidades que caracterizan a FSO.

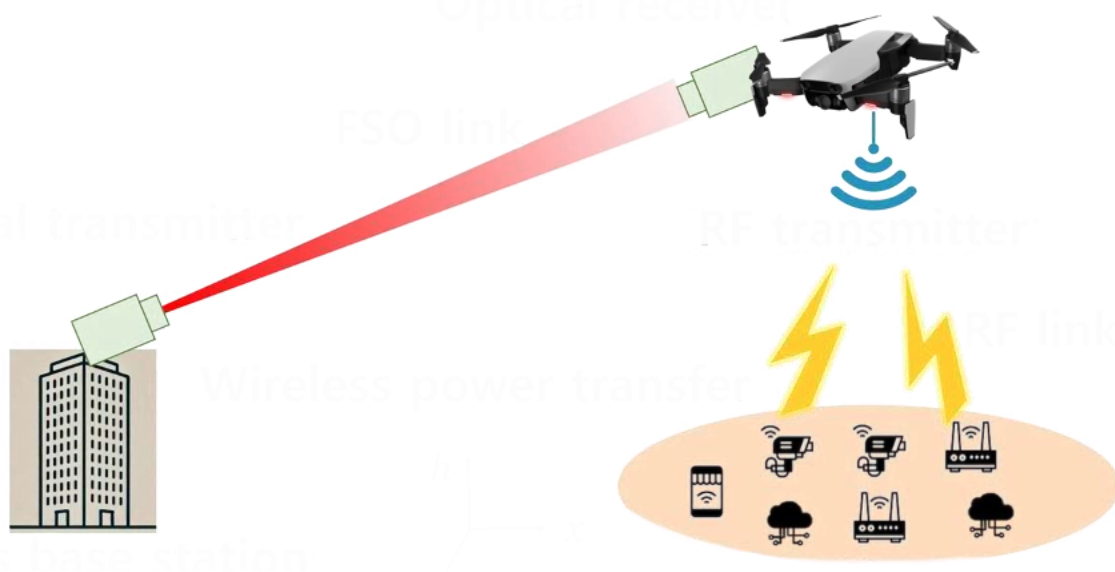


Figura: Esquema de funcionamiento de un enlace óptico en espacio libre

1.1.2 Ventajas Estratégicas de la Tecnología FSO

Velocidad Extrema y Gran Ancho de Banda

FSO no es simplemente una alternativa, sino una tecnología con ventajas competitivas únicas que la hacen ideal para escenarios específicos. FSO ofrece velocidades de transmisión de datos que rivalizan y, en algunos casos, superan a las de la fibra óptica. Los sistemas comerciales operan comúnmente en rangos de 100 Mbps a 10 Gbps, con capacidades experimentales que han alcanzado los 160 Gbps. Esta capacidad es fundamental para soportar aplicaciones de alta demanda como la transmisión de video en UHD, la realidad virtual y el soporte de redes 5G.

Operación sin Licencia e Inmunidad a Interferencias

A diferencia de las tecnologías de radiofrecuencia (RF) que operan en un espectro congestionado y regulado, FSO utiliza el espectro óptico, que no requiere licencias para su uso. Esto reduce drásticamente los costos operativos y acelera los tiempos de despliegue. Además, al usar luz, es completamente inmune a las interferencias electromagnéticas, garantizando una comunicación más limpia y estable.

Seguridad Inherente

La seguridad es uno de los puntos fuertes de FSO. El haz de luz es extremadamente estrecho y directivo, lo que hace que interceptarlo sea físicamente muy difícil sin interrumpir el enlace y alertar a los operadores. A diferencia de las señales de RF, no puede ser detectado con analizadores de espectro convencionales. Adicionalmente, la información puede ser cifrada para añadir una capa extra de protección.

Instalación Rápida y Rentable

El despliegue de FSO es rápido y económico en comparación con la instalación de fibra óptica, que requiere obras civiles costosas y prolongadas. Los transceptores pueden instalarse en tejados o incluso detrás de ventanas, conectando edificios en cuestión de horas. Esto la convierte en una solución ideal para el "problema de la última milla", redes corporativas y enlaces temporales.

1.1.3 Desafíos y Limitaciones Inherentes

Vulnerabilidad a Factores Atmosféricos

A pesar de sus notables ventajas, la fiabilidad de FSO está intrínsecamente ligada a las condiciones atmosféricas, siendo éste es el principal desafío de la tecnología. La señal óptica puede ser atenuada o distorsionada por diversos fenómenos:

- **Niebla y Nubes:** La niebla, compuesta por partículas de agua de un tamaño similar a la longitud de onda de la luz infrarroja, provoca una fuerte dispersión (dispersión de Mie) y atenuación, siendo el factor más limitante para el alcance y la disponibilidad del enlace.

Aeroganp

- **Turbulencia Atmosférica:** Las variaciones de temperatura y presión en el aire crean "bolsas" de diferente índice de refracción que actúan como lentes, provocando fluctuaciones en la intensidad de la señal. Este efecto puede degradar la tasa de error de bits (BER).
- **Absorción y Dispersión:** Moléculas en el aire como el vapor de agua y el CO₂ pueden absorber energía de la señal. La dispersión de Rayleigh, causada por partículas mucho más pequeñas que la longitud de onda, también contribuye a la atenuación.

Requisito de Línea de Vista y Apuntamiento Preciso

Los sistemas FSO requieren una línea de vista (LoS) directa y sin obstrucciones entre los transceptores. Obstáculos temporales como aves pueden causar interrupciones breves. Además, la estabilidad estructural de los edificios es crucial, ya que movimientos o vibraciones pueden desalinear los haces, interrumpiendo la comunicación. Los sistemas modernos incorporan mecanismos de apuntamiento, adquisición y seguimiento (PAT) para compensar dinámicamente estos movimientos.

1.1.4 FSO frente a otras tecnologías

La elección de una tecnología de comunicación depende del caso de uso específico. FSO, Fibra Óptica y RF presentan un conjunto de compromisos diferentes en términos de rendimiento, coste y fiabilidad.

- **FSO vs. Fibra Óptica:** La fibra ofrece una fiabilidad superior al ser inmune a las condiciones atmosféricas. Sin embargo, FSO puede ser más rápido en la transmisión pura, ya que la luz viaja aproximadamente un 50% más rápido en el aire que en el vidrio (3.3 μ s por km en FSO frente a 5 μ s por km en fibra). La principal ventaja de FSO es el coste y la velocidad de despliegue en distancias cortas y medias [2].
- **FSO vs. RF:** FSO ofrece un ancho de banda significativamente mayor y no requiere licencias de espectro. Es inmune a la saturación del espectro de RF y es inherentemente más seguro. Sin embargo, las tecnologías de RF, aunque afectadas por la lluvia intensa, son mucho menos vulnerables a la niebla que FSO. Para maximizar la disponibilidad, los sistemas híbridos FSO/RF se están convirtiendo en una solución popular, utilizando el enlace de RF como respaldo cuando las condiciones atmosféricas degradan la señal óptica [3].

1.1.5 Aplicaciones y Casos de Uso Actuales y Futuros

La versatilidad de FSO la posiciona como una tecnología clave en la evolución de las infraestructuras de comunicación globales. Se espera que [FSO] sea una de las tecnologías habilitadoras clave para la próxima generación de redes inalámbricas 6G.

- **Backhaul para 5G y Futuras Generaciones (B5G/6G):** La alta capacidad y baja latencia de FSO son ideales para conectar las celdas de las redes móviles,

especialmente en entornos urbanos densos donde instalar fibra es complejo y costoso [4].

- **Comunicaciones Espaciales:** FSO está revolucionando las comunicaciones por satélite. Permite enlaces de gran ancho de banda entre satélites en una constelación y conexiones de alta velocidad con estaciones terrestres. Proyectos como HydRON de la ESA, DYSCO del CNES y la misión LCRD de la NASA están demostrando la viabilidad de redes ópticas espaciales [5].
- **Defensa y Seguridad:** Las comunicaciones seguras y difíciles de interceptar de FSO son críticas para aplicaciones militares. El proyecto OPTIMAS, por ejemplo, busca desarrollar una solución FSO para defensa multidominio [6].
- **Conectividad Empresarial y "Última Milla":** Sigue siendo una de sus aplicaciones principales, ofreciendo una solución rentable para interconectar campus corporativos, extender redes de fibra y proporcionar acceso a internet de alta velocidad en zonas donde la fibra no llega.

1.1.6 El Mercado y el Futuro de FSO

Según análisis de mercado, se proyecta que el sector alcance los 2.000 millones de dólares para 2031, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 33,3% . Este crecimiento está impulsado por la demanda de las redes 5G, el aumento de las constelaciones de satélites y la necesidad de alternativas seguras y de alta capacidad a las tecnologías tradicionales.

North America Terrestrial Free Space Optical (FSO) Communication Market Size, (USD Million)

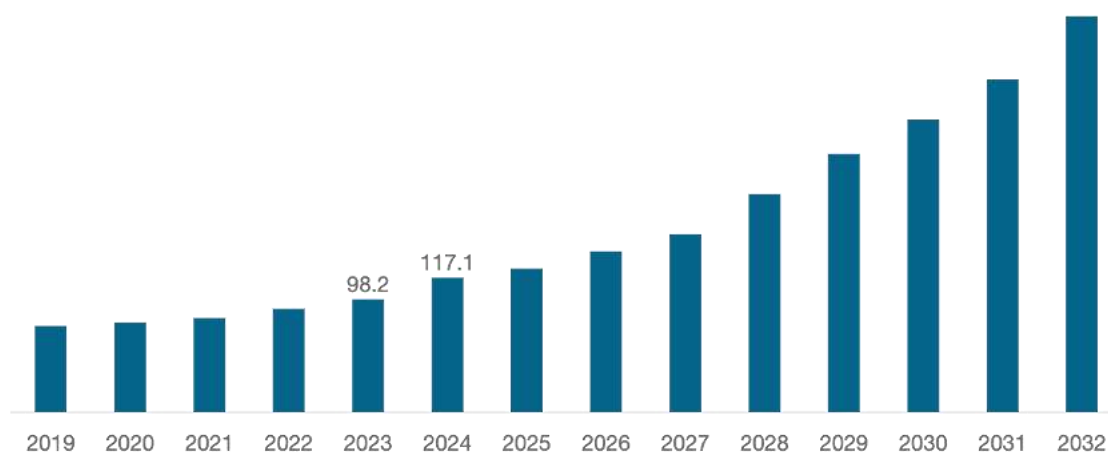


Figura: Crecimiento del mercado de FSO [7]

El futuro de FSO no reside en reemplazar a la fibra o a la RF, sino en su integración inteligente dentro de una arquitectura de red heterogénea. Los avances en técnicas de mitigación atmosférica, la miniaturización de componentes y la estandarización de

sistemas híbridos continuarán expandiendo su campo de aplicación, consolidándola como una tecnología convencional y no de nicho [8].

1.2 Tecnología desarrollada

1.2.1. El sistema de apuntamiento

En el piloto desarrollado se ha montado un láser con su correspondiente óptica de colimación alimentado mediante una fuente modulada que permite introducir la señal a transmitir. En paralelo, se diseña el receptor óptico que consiste en una matriz de nueve fotodiodos conectados en paralelo formando un array 3×3 que aumenta el área efectiva de captación y mejora la tolerancia a pequeñas desalineaciones del haz.

Los fotodiodos se combinan con una óptica de entrada que concentra la luz recibida y con una etapa electrónica que convierte la corriente óptica en una señal de tensión adecuada para ser digitalizada y enviada mediante un dongle conectado al propio sistema embarcado, típicamente con conectividad 5G. Esta transmisión forma parte del planteamiento de red 3D: el dron no solo recibe la información óptica, sino que la reinyecta en la red móvil, permitiendo que los datos derivados se distribuyan a otros nodos o infraestructuras.

El elemento que hace operativo el enlace a distancia es el sistema de seguimiento automático. En la estación terrestre se instala una cámara montada en un gimbal, cuya orientación es controlada por ordenador. El vídeo capturado se procesa mediante un modelo YOLO capaz de identificar en tiempo real la posición del dron en la imagen. A partir del desplazamiento del dron respecto al centro del encuadre se generan señales de corrección que se envían al gimbal, de forma que éste mantenga siempre el objetivo centrado. Como la cámara y el láser han sido calibrados para compartir dirección o un offset conocido, el seguimiento de la imagen se traduce directamente en el seguimiento óptico del dron.

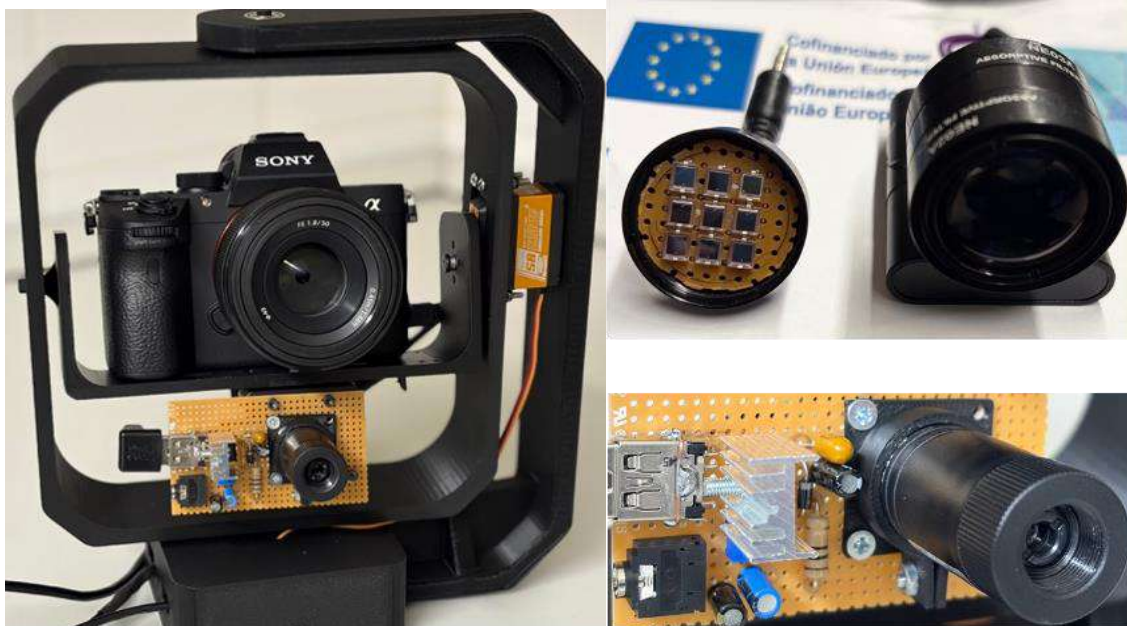


Figura: Gimbal (izda.) detector (dcha. arriba) y emisor (dcha. abajo) construidos.

1.2.2 El sistema de control

Se ha desarrollado código para el **Arduino IDE**, el cual emplea una combinación de **C** y **C++** como lenguajes de programación. Este entorno de desarrollo es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y accesibilidad, lo que permite una rápida prototipación de sistemas embebidos. En este caso, el código implementa dos funciones principales que son esenciales para el control del sistema.

La primera función principal del código es la **decodificación de los mensajes** enviados por el ordenador a través del puerto serie. Estos mensajes contienen información sobre los **ángulos de cabeceo** (pitch) y **guiñada** (yaw) del dispositivo, que son necesarios para controlar los servomotores que manejan el movimiento físico del sistema. Este control se realiza a través del **módulo PCA9685**, un controlador de servos que se comunica con el microcontrolador Arduino mediante el protocolo **I2C** (Inter-Integrated Circuit).

El PCA9685 permite controlar hasta 16 servomotores de manera independiente, y cada uno de estos servos se conecta a un **canal de salida** específico del módulo. Para cada servo, se envía una señal de **modulación por ancho de pulsos (PWM)**, que es la técnica utilizada para regular el movimiento de los servos. La modulación PWM se basa en la variación del **ancho del pulso** para controlar el ángulo del servo: a mayor duración del pulso, mayor será el ángulo de rotación.

Sin embargo, el PCA9685 no trabaja directamente con un valor de PWM convencional, sino con una **resolución de 12 bits**, es decir, puede recibir valores codificados entre **0** y **4095**. Esto significa que el rango de movimiento del servo se mapea a este rango numérico para obtener un control preciso. Para esto, se realiza una transformación de los valores de PWM proporcionados por el sistema de control de los ángulos de cabeceo y guiñada, asignando los valores correctos de acuerdo con la resolución del PCA9685. Además, el código también se encarga de establecer la **frecuencia de operación** de los

Aeroganp

servomotores, lo que se configura mediante un control del PCA9685 para asegurar que los servos funcionen dentro de los parámetros diseñados para su correcta operación.

1.2.3. Sistema de Detección y Seguimiento del Dron

El sistema de **detección y seguimiento** del dron está basado en dos elementos principales: un **detector** y un **tracker**. Estos elementos trabajan conjuntamente para localizar y hacer seguimiento de los objetos (en este caso, el dron) en el espacio, y están implementados usando la popular librería **OpenCV** de Python, que es conocida por su amplio soporte y facilidad de uso en visión por computador.

Detector: YOLOv8

El detector utilizado en este sistema es el **YOLOv8** (You Only Look Once), una de las versiones más avanzadas de la famosa familia de modelos YOLO para detección de objetos en imágenes. Este modelo, desarrollado por **Ultralytics**, se basa en una **arquitectura optimizada de redes neuronales convolucionales (CNN)**. Las CNNs son especialmente adecuadas para tareas de visión por computador porque están diseñadas para identificar patrones espaciales en las imágenes.

YOLOv8 destaca por varias mejoras clave respecto a versiones anteriores y otros modelos de detección:

- **Mayor precisión:** Se mide típicamente con la métrica **mAP** (mean Average Precision), que evalúa la capacidad del modelo para detectar correctamente los objetos en la imagen.
- **Tiempos de inferencia más rápidos:** Esto es crucial para aplicaciones en tiempo real, como el seguimiento de drones, donde es necesario que el modelo procese la imagen y realice predicciones en tiempo real sin retrasos significativos.
- **Mejor manejo de objetos pequeños:** YOLOv8 ha mejorado su capacidad para detectar objetos pequeños dentro de las imágenes, lo que es especialmente útil en escenarios dinámicos con múltiples objetos en movimiento.
- **Entrenamiento más estable:** Gracias a las mejoras en la función de pérdida y en la estructura de las capas de la red, YOLOv8 es más robusto y estable durante el proceso de entrenamiento, lo que resulta en un modelo más generalizable.

En resumen, YOLOv8 ofrece una combinación equilibrada de **precisión, velocidad y facilidad de uso**, lo que lo hace adecuado para tareas de detección de objetos en tiempo real, como en este sistema de seguimiento de dron.

Tracker: BoTSORT

Para el seguimiento del dron, se utiliza **BoTSORT** (Bootstrapping and Tracking with SORT), un **tracker** de última generación que mejora sobre métodos anteriores como **DeepSORT** o **ByteTrack**. El propósito del tracker es asociar correctamente las detecciones del detector (YOLOv8) a lo largo del tiempo, lo que permite seguir el movimiento de un objeto de manera estable. BoTSORT introduce varias mejoras importantes:

Aeroganp

- *Modelo de "appearance embedding" robusto:* Este modelo, basado en características visuales del objeto, ayuda a identificar y asociar correctamente las detecciones con el objeto real a lo largo del tiempo.
- *Asociación más precisa mediante el filtro de Kalman mejorado:* El filtro de Kalman es un algoritmo matemático utilizado para predecir y actualizar el estado de un objeto en movimiento. BoTSORT lo ha optimizado para mejorar la precisión del seguimiento.
- *Estrategia de asociación secuencial:* Esta estrategia permite mejorar el rendimiento en escenarios con oclusiones(cuando el objeto se oculta temporalmente por otros objetos) y movimientos rápidos, problemas comunes en el seguimiento de objetos en el mundo real.

BoTSORT sobresale por su equilibrio entre **precisión** y **velocidad**, permitiendo realizar un seguimiento eficaz sin sacrificar el rendimiento en tiempo real. Esta combinación lo hace ideal para complementar detectores modernos como YOLOv8 en tareas de seguimiento continuo.

Desempeño del sistema

Las **gráficas** adjuntas comparan el rendimiento de **YOLOv8** y **BoTSORT** con otros modelos de detección y seguimiento utilizando métricas representativas como **mAP** (precisión de detección) y **MOTA** (Multiple Object Tracking Accuracy), así como la **latencia** (tiempo de inferencia). Estas gráficas demuestran la superioridad de YOLOv8 y BoTSORT en términos de precisión, velocidad y robustez en condiciones desafiantes, justificando su elección para esta aplicación de detección y seguimiento de drones en tiempo real.

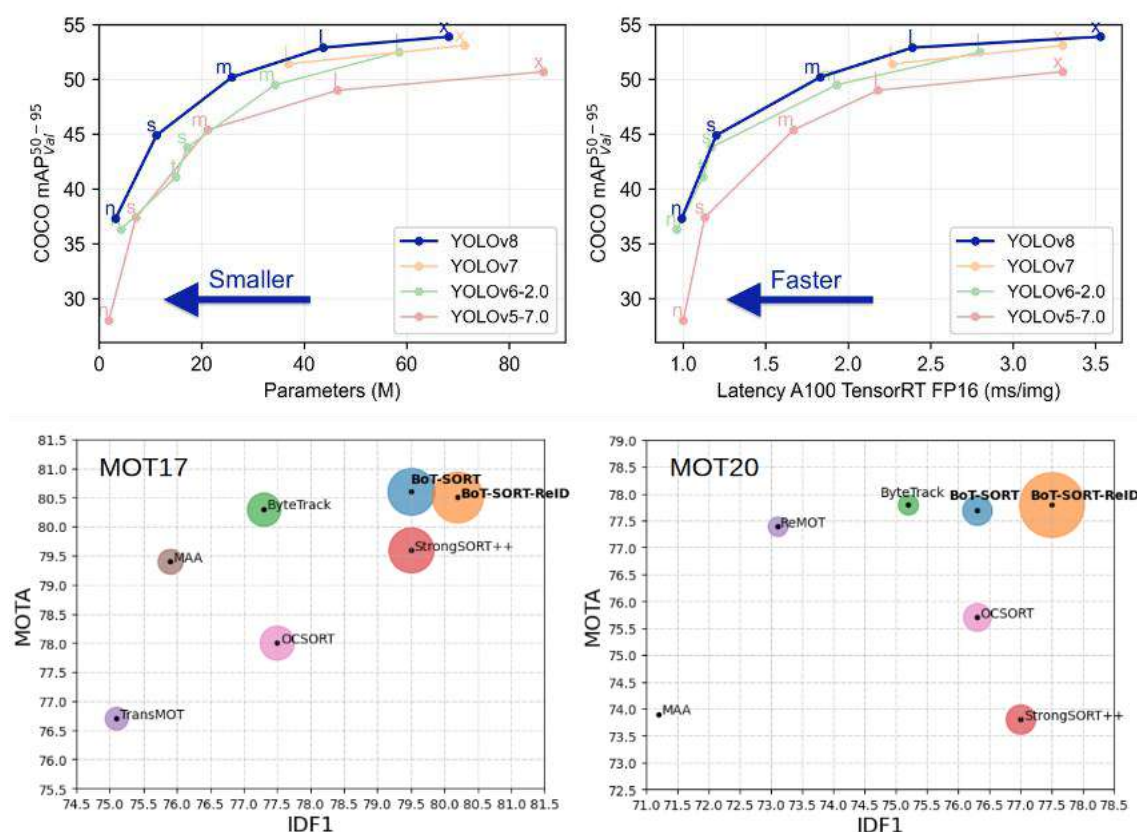


Figura: Comparativa de rendimiento de YOLO8 (arriba.) y BoTSORT (abajo).

1.3 Conexión con Redes 5G

La integración de un enlace óptico en espacio libre (FSO) con una red 5G[9] se puede realizar a través de varias fases que optimizan el rendimiento de la red y permiten una conexión eficiente. Esta integración se lleva a cabo en diversos niveles de la infraestructura de la red 5G, desde el backhaul hasta la interconexión de estaciones base. A continuación, se explica cómo se establece esta conexión.

1.3.1 Conexión del Enlace FSO con la Infraestructura 5G

Los enlaces FSO se conectan directamente a la infraestructura de la red 5G, que incluye las estaciones base (gNB o eNodeB) y las unidades de transmisión. Este tipo de enlace actúa como un medio de conexión de alta velocidad para el backhaul, permitiendo el transporte de datos entre estaciones base o entre una estación base y un centro de datos. En áreas donde el cableado físico es inviable o costoso, los enlaces FSO se convierten en una solución rápida y eficiente para proporcionar la conectividad necesaria para la red 5G.

Establecimiento del enlace de datos

Una vez que el enlace FSO está instalado, los datos de la red 5G (que incluyen las comunicaciones de usuario, tráfico de IoT, etc.) se redirigen a través del enlace FSO. Los datos de la red 5G, que inicialmente están en formato digital, se convierten en señales ópticas mediante un transceptor óptico en el extremo de transmisión. Estas señales ópticas son enviadas a través del aire utilizando el enlace FSO y, al llegar al receptor, se

convierten nuevamente en datos digitales para ser procesados por las estaciones base de la red 5G.

Integración del Backhaul 5G

El backhaul en una red 5G es una parte crucial que conecta las estaciones base con el núcleo de la red, permitiendo la transmisión de grandes cantidades de datos. Los enlaces FSO pueden integrarse como una solución de backhaul en áreas donde las conexiones por fibra óptica no están disponibles. En estos casos, el enlace FSO proporciona un canal de comunicación de alta capacidad entre las estaciones base y otros puntos clave en la infraestructura de la red 5G. Este tipo de conexión es especialmente útil en situaciones donde se requiere flexibilidad y rapidez en el despliegue de redes de alta capacidad.

Sincronización y Control de Calidad de Servicio (QoS)

Es esencial garantizar que los enlaces FSO estén correctamente sincronizados con la red 5G para asegurar una calidad de servicio (QoS) consistente y sin interrupciones. En este sentido, se utilizan protocolos estándar de telecomunicaciones para la gestión del tráfico de datos entre la red 5G y el enlace FSO. Estos protocolos garantizan que la transmisión de datos sea fluida, incluso en situaciones de alta demanda. Además, la gestión de la QoS en los enlaces FSO asegura que los diferentes tipos de tráfico (como voz, datos o vídeo) se gestionen adecuadamente para evitar la congestión o la pérdida de paquetes.

Redundancia y Resiliencia

En entornos urbanos densos o en zonas con condiciones meteorológicas adversas, la resiliencia del enlace FSO es un factor crítico. Para garantizar la continuidad de la red 5G, se implementan enlaces FSO redundantes o sistemas de diversificación, como los enlaces de microondas o conexiones 5G tradicionales. La redundancia permite que, en caso de que un enlace FSO se vea afectado por condiciones climáticas, otro enlace tome el control sin interrumpir el servicio. Esto mejora la disponibilidad y la fiabilidad de la infraestructura de la red 5G.

1.3.2 Beneficios de la Conexión FSO-5G

La integración de los enlaces FSO con las redes 5G proporciona varios beneficios clave:

- **Alta capacidad y eficiencia:** Los enlaces FSO son capaces de transmitir grandes volúmenes de datos a altas velocidades, lo que es crucial para satisfacer las demandas de la red 5G, especialmente en aplicaciones que requieren ancho de banda elevado, como el streaming en 4K/8K, realidad aumentada, o vehículos autónomos.
- **Despliegue rápido y flexible:** Los enlaces FSO permiten un despliegue rápido y sencillo sin necesidad de excavar o tender cables, lo cual es beneficioso en entornos urbanos densos o en ubicaciones de difícil acceso.

Aeroganp

- **Eficiencia en costos:** En lugares donde la instalación de fibra óptica es costosa o impracticable, los enlaces FSO proporcionan una alternativa económica, lo que permite un acceso más amplio a la conectividad de alta velocidad.

1.3.3 Desafíos y Soluciones

Aunque los enlaces FSO ofrecen muchas ventajas, también presentan desafíos, como la vulnerabilidad a las condiciones meteorológicas (niebla, lluvia intensa, nieve). Para mitigar estos efectos, se pueden incorporar tecnologías como el control adaptativo de potencia, la modulación robusta y la integración con enlaces de radiofrecuencia de respaldo para asegurar la continuidad de la transmisión de datos.

Aunque los enlaces ópticos en espacio libre (FSO) presentan ventajas claras en términos de **alta capacidad, baja latencia y rapidez de despliegue**, su funcionamiento está estrechamente condicionado por el **medio atmosférico**, ya que la propagación del haz óptico se realiza directamente a través del aire. Entre los principales desafíos se encuentran fenómenos meteorológicos adversos como la **niebla**, la **lluvia intensa**, la **nieve**, el **polvo en suspensión** o incluso las **turbulencias térmicas**, que pueden provocar atenuación, dispersión del haz y fluctuaciones rápidas en la potencia recibida. En particular, la niebla constituye el factor más crítico, ya que el tamaño de las gotas es comparable a la longitud de onda óptica utilizada, generando pérdidas severas que pueden comprometer el enlace.

Referencias y enlaces de interés

- [1] [Comunicación óptica por el espacio libre](#)
- [2] [Speed Comparison: FSO vs Fiber](#)
- [3] [Free Space Optical \(FSO\) vs Radio](#)
- [4] [On campus low-cost FSO communication link analysis](#)
- [5] [IAC FSO](#)
- [6] [OPTIMAS 2024](#)
- [7] [Tamaño del mercado de comunicaciones ópticas](#)
- [8] [Free Space Optical \(FSO\) Market](#)
- [9] [Tecnología 5G](#)

2. Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en monitorización aérea

2.1. Monitorización en exteriores

2.1.1. Introducción

En este trabajo se proporcionan datos comparativos de diferentes técnicas de documentación tridimensional (3D) que permitirán la selección más adecuada en cada caso para su aplicación en distintos contextos de ingeniería tanto aéreos como subacuáticos. Se ha utilizado para ello como caso de estudio un dique seco, ya que permite la toma de datos en vacío y lleno para contrastar las precisiones en ambos supuestos. Las técnicas empleadas han sido la fotogrametría *Structure from Motion* y *Multi View Stereo* (SfM-MVS), utilizada tanto en el ámbito aéreo como en el subacuático; el LiDAR, aplicado únicamente en el levantamiento aéreo mediante UAV (vehículos aéreo no tripulado). En cuanto a las plataformas para la realización de batimetrías se ha empleado un vehículo operado remotamente (ROV), un UAV, y un barco no tripulado (USV). Estas plataformas utilizadas han portado sensores ópticos en el primer caso y acústicos en los otros dos. Se ha utilizado un láser terrestre (TLS) para obtener una nube de puntos de referencia.

El objetivo es evaluar la precisión y la viabilidad operativa de distintas tecnologías de adquisición de datos aplicadas a la documentación y modelado 3D de infraestructuras. De forma complementaria, se busca validar los resultados en un entorno controlado mediante su comparación con un modelo de referencia de muy alta resolución. Con ello, los resultados obtenidos no solo permiten identificar las capacidades y limitaciones de cada técnica, sino también optimizar su integración en los flujos de trabajo de la ingeniería, permitiendo contribuir a la selección por parte de cualquier técnico, de la tecnología o la combinación de estas más adecuada para su aplicación.

2.1.2. Material y método

Caso de estudio

Se plantea como objeto de estudio el dique de San Julián, más conocido como dique de La Campana (Figura 1). Se trata de un dique seco situado en el interior del Arsenal Militar de Ferrol. Fue construido en el Siglo XIX, siendo entonces el mayor del mundo y la mayor obra hidráulica de España de ese siglo. El muelle es una gran estructura de mampostería que se asemeja a la forma del casco de un barco, con curvas en la base, escalones laterales que convergen en la proa, y un sistema diseñado para encajar la compuerta de cajón en la popa. Su construcción comenzó en 1873 y fue inaugurado en 1879. Las dimensiones del muelle son notables, especialmente considerando la época en que fue diseñado y construido: 145 metros de eslora, 27 metros de manga y 12 metros de calado.

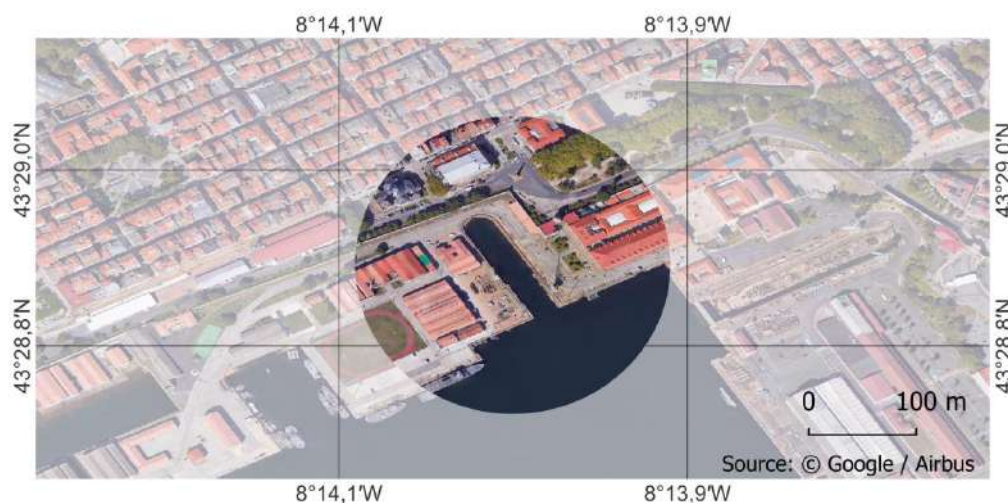


Figura 1. Localización del dique de San Julián (Ferrol – A Coruña)

Se elige esta obra civil para el estudio debido a las variaciones topográficas en sus paredes laterales, que proporcionan una superficie compleja con una considerable variación 3D. Esta complejidad permitirá un análisis más exhaustivo de los resultados comparativos, además de constituir una obra civil de importancia histórica y cultural. Sus dimensiones y la posibilidad que nos brindan de vaciar y llenar el dique para la realización de los trabajos que se plantean, proporcionan unas condiciones óptimas y singulares para plantear los objetivos de este proyecto.

Material

Se utiliza la versión 2.0.3 de Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, Rusia, 2023). Este software permite llevar a cabo el procesamiento de imágenes para obtener una reconstrucción del territorio en tres dimensiones, posibilitando un flujo de trabajo automatizado. Por otro lado, para el procesamiento de los datos LiDAR, se emplea DJI TERRA. Los datos de nubes de puntos capturados permiten la reconstrucción de un modelo 3D preciso, incorporando GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e IMU (*Inertial Measurement Unit*).

Para la comparación de las nubes obtenidas, se emplea la versión 2.13.1 de Cloud Compare. Este software libre permite la edición y comparación de nubes de puntos, que admite en múltiples formatos, ya sean archivos LiDAR, vectoriales o ráster. Ofrece herramientas para el análisis de datos como cálculo de distancias entre nubes o entre nube-malla o cálculo de estadísticos. En el Anexo II se presentan las características técnicas de las plataformas y sensores empleados.

Método

Se establecieron flujos de trabajo estandarizados que abarcan planificación, georreferenciación GNSS-RTK, procesamiento fotogramétrico y reconstrucción 3D.

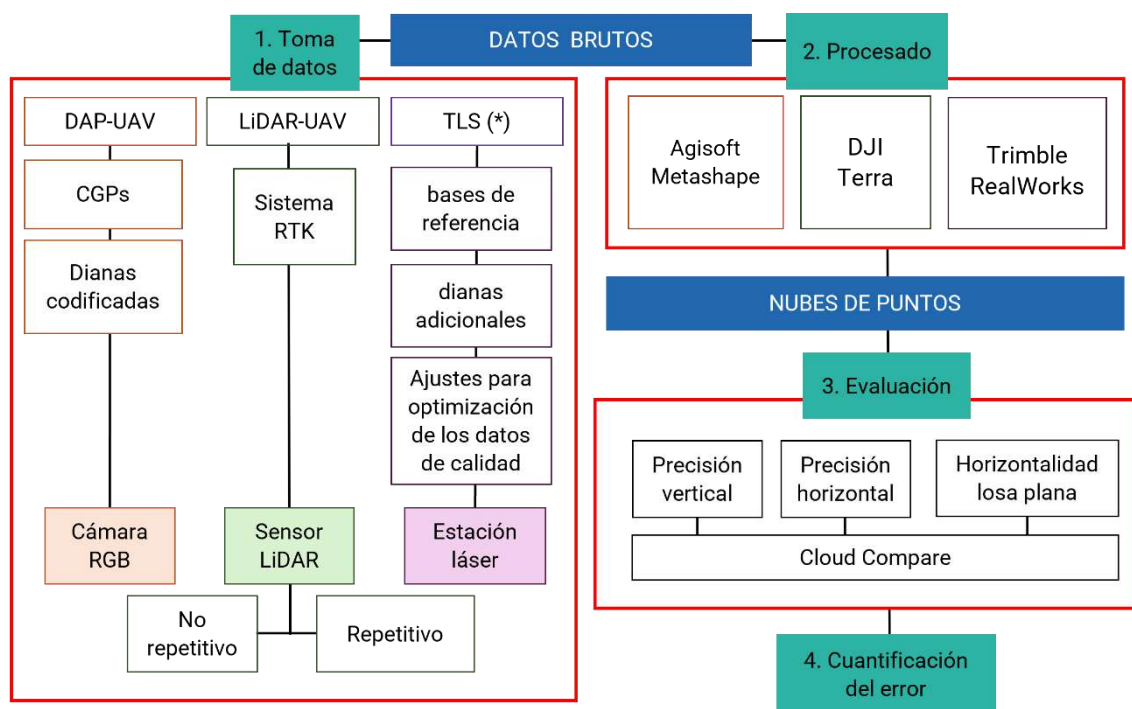
Se ha realizado con el dique vacío la comparación de metodologías LiDAR y fotogrametría SfM-MVS empleando un láser escáner terrestre como técnica de

Aeroganp

referencia, analizando la precisión de la nube de puntos y la consistencia de esta (figura 2).

El segundo estudio, se centra en la utilización de ROVs con sensores ópticos y UAV con sonda monohaz (SBES) para la obtención de datos batimétricos (figura 3), esenciales para la cartografía subacuática y la caracterización de fondos marinos. Se explora la capacidad del ROV para la toma de fotografías en ambientes submarinos, así como las técnicas de medición de profundidad empleadas por las sondas.

Se desarrolla además la captura de datos con USV (figura 4) y sonda multihaz (MBES) así como investigaciones complementarias que abordan aspectos clave en la fusión de datos geospaciales y batimétricos.



(*) Técnica de referencia

Figura 2. Captura de datos con el dique vacío

Aeroganp

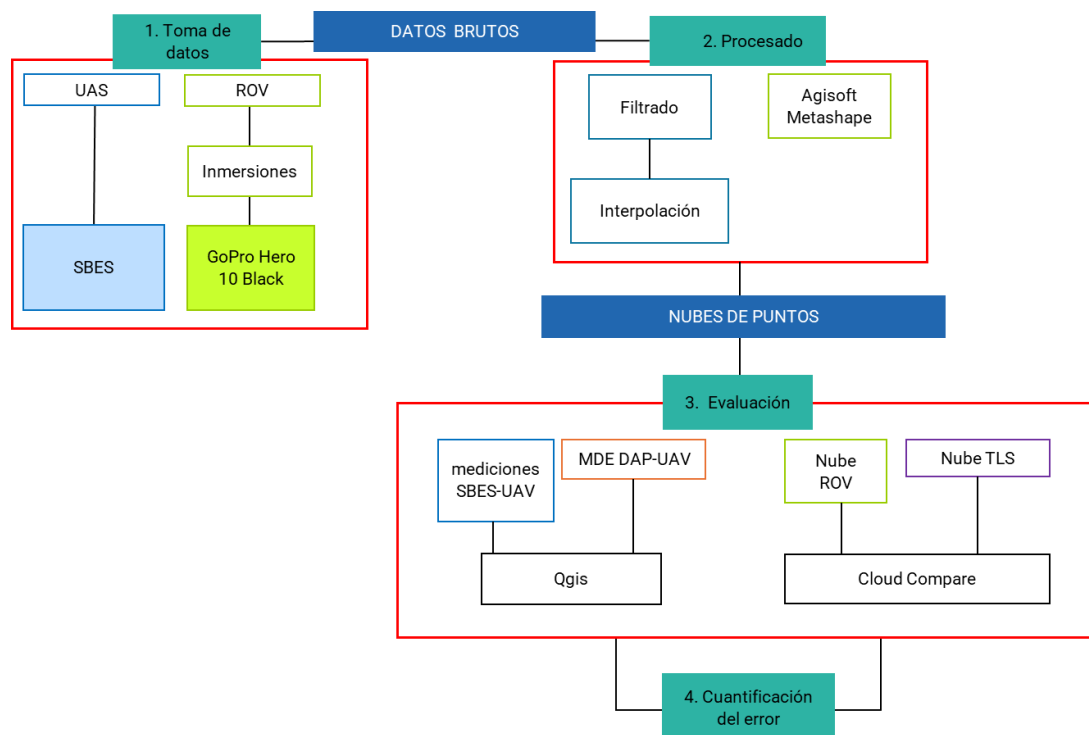


Figura 3. Captura de datos y procesamiento (dique lleno) mediante sonda SBES y cámara GOPRO

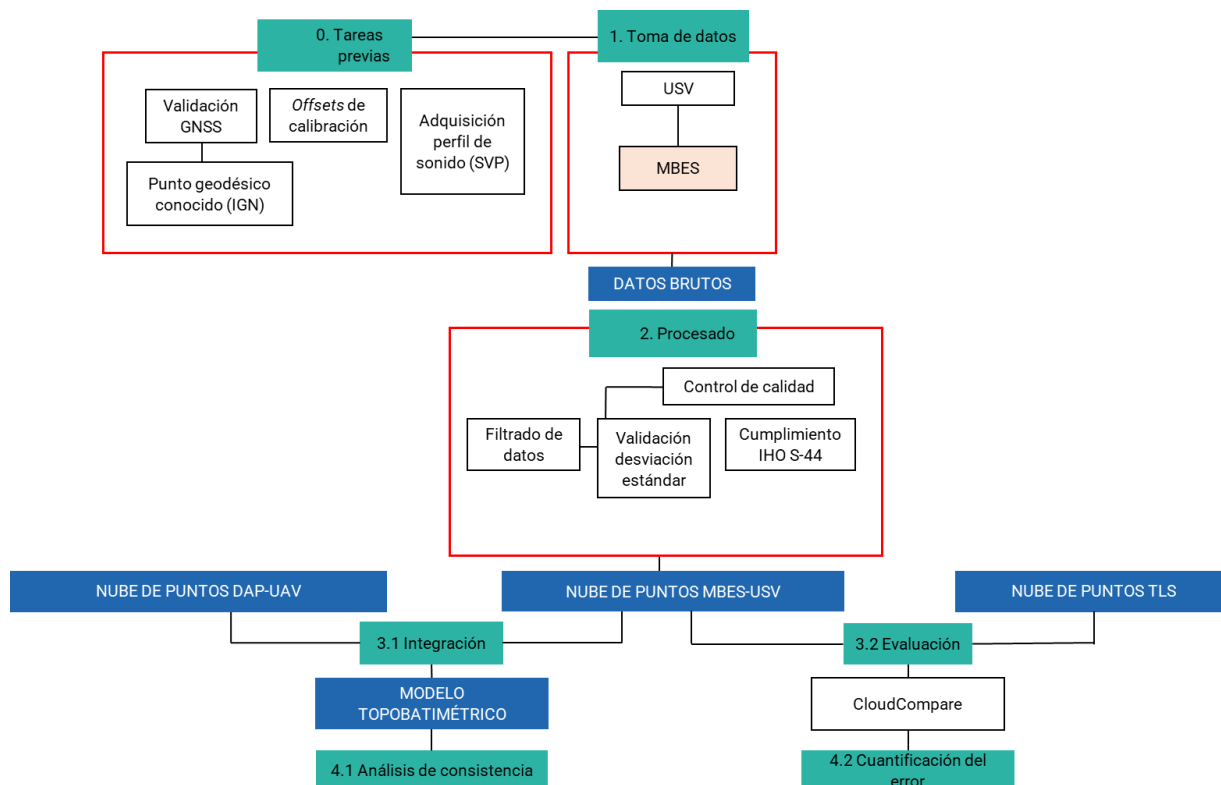


Figura 4. Captura de datos y procesamiento (dique lleno) mediante USV y MBES e integración de datos con DAP-UAV

2.1.3. Resultados

Se puede ver el [resultado del modelo 3D del dique seco](#) del levantamiento fotogramétrico en la captura de la figura 5 y el [video](#) generado con el software de inteligencia artificial LUMA AI. Se observa una captura del mismo en la figura 6.

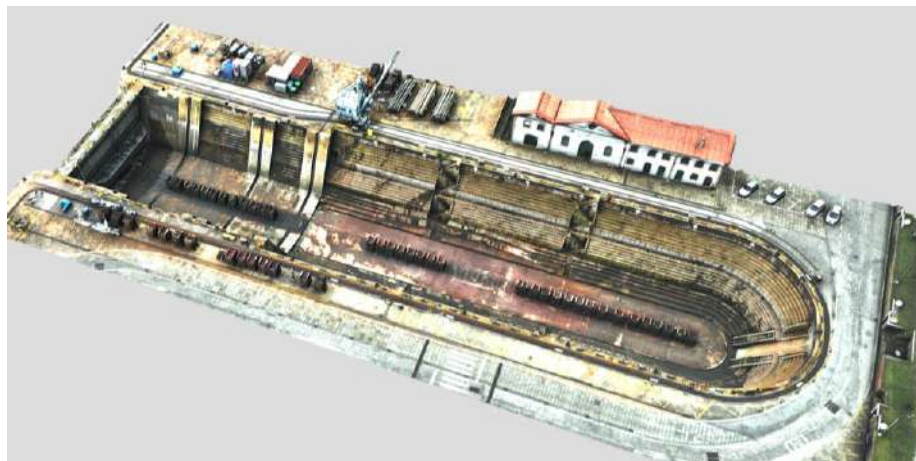


Figura 5. Modelo generado mediante fotogrametría DAP-UAS

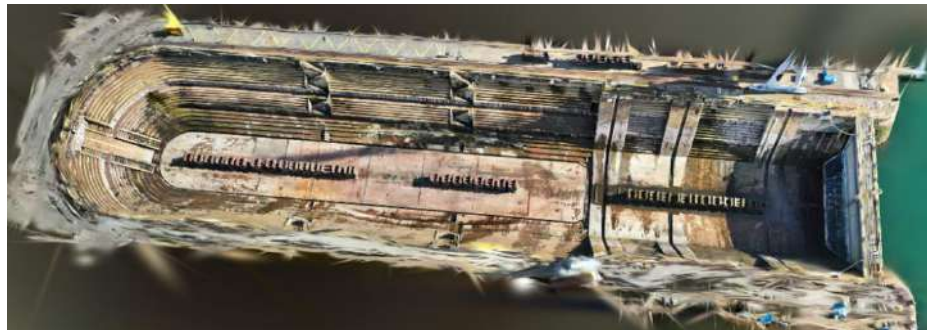


Figura 6. Modelo 3D generado con software de inteligencia artificial

Evaluación de tecnologías para la obtención de datos terrestres

El análisis reveló que el LiDAR-UAV y DAP-UAV produjeron errores subdecimétricos frente a TLS, adecuados para la documentación estructural. El DAP-UAV alcanzó la mejor consistencia planimétrica con un $RMSE_h \approx 0.025$ m, mientras que el LiDAR-UAV en modo no repetitivo obtuvo el mejor desempeño vertical ($RMSE_z \approx 0.019$ m). El modo repetitivo de LiDAR mostró menor estabilidad, con discrepancias en planos horizontales y superficies lineales. En densidad de puntos, LiDAR-UAV (no repetitivo) superó en un 17.4% a DAP-UAV, aunque este último destacó en calidad radiométrica y homogeneidad interna.

La IA permite generar modelos 3D fotorrealistas a partir de imágenes, agilizando el flujo de trabajo y reduciendo la edición manual. Es especialmente útil para inspección rápida

y detección visual de anomalías, proporcionando coherencia general y rapidez en la visualización. No obstante, presenta limitaciones importantes: los modelos carecen de escala y georreferenciación, las áreas no capturadas en las imágenes pueden ser “inventadas” por la IA, comprometiendo la fidelidad de detalles finos. En consecuencia, su uso está restringido a visualización e inspección rápida, requiriendo métodos convencionales para obtener datos métricos confiables.

Evaluación de tecnologías para la obtención de datos batimétricos

La SBES aerotransportada en UAV demostró ser una alternativa viable para levantamientos batimétricos rápidos en áreas confinadas y de difícil acceso. Frente al modelo fotogramétrico de referencia, el sonar presentó una diferencia de profundidad media de 0.15 m y un RMSE de 0.58 m. Las mayores discrepancias se localizaron en zonas de borde y sectores con estructuras de madera, donde la geometría irregular favoreció la dispersión de la señal acústica. El análisis de perfiles transversales y longitudinales evidenció que, en áreas planas y libres de obstáculos, los datos sonar coinciden con el modelo DAP-UAV; sin embargo, en pendientes pronunciadas o superficies complejas, el sonar tiende a subestimar la profundidad y presenta vacíos en los márgenes. Estas limitaciones se asocian a problemas de atenuación, dispersión y reflexiones múltiples, especialmente en superficies verticales o irregulares. Si bien los resultados son menos precisos que los obtenidos con técnicas ópticas o TLS, la portabilidad y rapidez del sistema lo hacen útil para levantamientos preliminares o monitoreos frecuentes.

El uso de un ROV equipado con un sistema multicámara permitió generar modelos 3D en varias zonas del dique. A pesar de las limitaciones por turbidez, refracción y pérdida de contraste, los modelos obtenidos alcanzaron una precisión satisfactoria en las dos zonas de estudio con errores medios de 3.1 y 4.3 cm y RMSE entre 4.6 y 5.6 cm respectivamente respecto al modelo de referencia. Esto confirma que estrategias de adquisición adecuadas permiten resultados aceptables sin necesidad de equipos de alto costo.

El sistema MBES-USV demostró una alta maniobrabilidad y eficiencia en la adquisición batimétrica en entornos confinados, ofreciendo una alternativa segura y precisa frente a las embarcaciones tripuladas tradicionales.

La integración de datos MBES–UAV para generar modelos topobatimétricos continuos planteó diversos retos, especialmente en la zona de solape entre el dominio aéreo y el subacuático. Para minimizar las discrepancias, es fundamental planificar las adquisiciones considerando las condiciones de marea en un caso real (marea baja para los vuelos UAV y marea alta para los levantamientos MBES), de modo que se garantice una cobertura complementaria.

Tabla 1. Errores y densidades de puntos de las técnicas evaluadas

Método	Precisión / Error	Densidad de puntos
DAP-UAV (fotogrametría aérea)	RMSEz: 0.021 m RMSEh: 0.025 m	12675 pts/m ²

LiDAR-UAV (no repetitivo)	RMSEz: 0.019 m RMSEh: 0.027 m	14873 pts/m ²
LiDAR-UAV (repetitivo)	RMSEz: 0.027 m RMSEh: 0.032 m	13478 pts/m ²
SBES-UAV (sonar monohaz en dron)	RMSEz: 0.579 m	-
ROV con sistema multicámara (fotogrametría subacuática)	RMSE: 0.046 m	-
MBES-USV (sonar multihaz embarcado)	RMSE: 0.192 m	-

2.1.4. Conclusiones

La integración de tecnologías aéreas (DAP-UAV, LiDAR-UAV, SBES-UAV) y subacuáticas (ROV multicámara y MBES-USV) demostró ser técnicamente viable para generar una caracterización 3D precisa y coherente del área de estudio. La comparación con modelos de referencia confirmó que la mayoría de los sistemas alcanzan precisiones subdecimétricas, suficientes para aplicaciones de ingeniería, patrimonio arquitectónico y análisis morfológico.

El análisis comparativo permite establecer las ventajas e inconvenientes de aplicación de cada tecnología:

- **DAP-UAV** destaca por su alta resolución, calidad visual y coherencia planimétrica, especialmente en superficies con buena textura.
- **LiDAR-UAV** se posiciona como la mejor alternativa para geometrías complejas o baja respuesta radiométrica, gracias a su robustez altimétrica.
- **UAV-SBES** demuestra ser una solución eficiente para batimetría en aguas someras, proporcionando datos de forma ágil, aunque limitado en paredes verticales o taludes pronunciados.
- **ROV multicámara** ofrece una solución accesible y de bajo costo para el medio subacuático, con precisiones aceptables y buena consistencia interna, aunque afectada por turbidez, profundidad y grandes volúmenes de datos lo que dificultó la consecución de un modelo 3D completo.
- **USV-MBES** destaca por su alta precisión en la batimetría de áreas planas y uniformes y por su capacidad de cubrir grandes extensiones de manera eficiente. Presenta un resultado confiable en superficies complejas como escalones y paredes laterales, aunque los errores se incrementan en coberturas abruptas reflejando las limitaciones en cobertura acústica local.

Se recogen en el Anexo I las ventajas, limitaciones y posibles aplicaciones de las plataformas y sensores de última generación analizados para que pueda servir de referencia para la toma de decisiones de profesionales y agentes implicados.

2.2. UAV en interiores

2.2.1. Introducción

La fotogrametría mediante UAVs en entornos interiores representa un avance estratégico para la digitalización 3D de activos complejos, especialmente en escenarios donde los métodos tradicionales de medición resultan inviables, peligrosos o económicamente ineficientes. Su importancia radica en la capacidad de generar modelos 3D de alta fidelidad, nubes de puntos densas y réplicas digitales precisas (Digital Twins) en espacios de difícil acceso, permitiendo una toma de decisiones basada en información geométrica y visual detallada.

En el ámbito industrial y de servicios, la fotogrametría *indoor* con drones puede permitir la inspección visual y geométrica de infraestructuras críticas, incluyendo calderas industriales, tanques de almacenamiento, recipientes a presión, chimeneas, redes de tuberías y alcantarillado. En ingeniería civil y construcción, la integración de fotogrametría *indoor* permite el seguimiento periódico del progreso de obras. Desde una perspectiva civil y patrimonial, los drones facilitan la documentación de interiores históricos, museos, iglesias o yacimientos arqueológicos sin contacto físico, contribuyendo a la preservación digital del patrimonio.

Dentro de este proyecto hemos querido avanzar en el desarrollo de drones que puedan volar de forma autónoma en entornos interiores, y que faciliten la fotogrametría en estos entornos.

2.2.2. Estructura hardware y software, plataformas usadas en el proyecto.

Para el desarrollo de drones capaces de volar de forma autónoma en entornos interiores, pueden adoptarse, en términos generales, dos enfoques diferenciados. Por un lado, es posible recurrir a soluciones comerciales cerradas, como las ofrecidas por fabricantes consolidados (por ejemplo, DJI u otros sistemas equivalentes), que proporcionan plataformas altamente integradas pero con un acceso limitado a los niveles más bajos de control, percepción y planificación. Por otro lado, existen arquitecturas abiertas que permiten una personalización completa del hardware, del autopiloto y de los sensores empleados, así como el desarrollo de software propio adaptado a los requisitos específicos de la aplicación. En el contexto de este trabajo, y atendiendo a los retos científicos y técnicos que se pretenden abordar —particularmente en lo relativo a percepción, navegación y control en entornos interiores complejos—, se ha optado por el uso de arquitecturas abiertas. Este enfoque proporciona la flexibilidad necesaria para seleccionar los sensores más adecuados al entorno de operación, experimentar con distintas configuraciones de hardware y desarrollar software experimental propio.

Desde el punto de vista hardware, la plataforma empleada para las pruebas experimentales, y que ha sido convenientemente adaptada para los objetivos del proyecto, es el dron Holybro X500-V2. Esta plataforma la hemos adaptado/ampliado, dotándola de los sensores necesarios para lograr el vuelo autónomo en interiores, así como de los elementos de procesamiento y

control más adecuados. Otras plataformas en las que pretendemos aplicar los resultados obtenidos hasta el momento son los drones de T-drone MX860 y el M690 Pro.

Los drones considerados incorporan un autopiloto dedicado encargado de las tareas de control de bajo nivel. En este sentido, se ha trabajado con autopilotos de la familia Pixhawk, evaluando diferentes modelos, entre ellos Pixhawk Cube Orange, el 6C, y el 6X. Estos dispositivos se encargan de la estimación básica del estado, la estabilización del vehículo y la ejecución de los lazos de control críticos en tiempo real.

Adicionalmente, cada plataforma incorpora un companion computer, cuya función principal es descargar al autopiloto de aquellas tareas computacionalmente intensivas que podrían comprometer la estabilidad del vuelo si se ejecutasen en el propio controlador embebido. Entre estas tareas se incluyen algoritmos de percepción, planificación, fusión sensorial avanzada o control de alto nivel. En la implementación actual se ha optado por el uso de una Raspberry Pi, que puede conectarse al autopiloto a través de uno de sus puertos de telemetría o integrarse físicamente junto a este (usando un computing module, CM4), formando así un sistema compacto y modular.

El sistema se completa con un ordenador de tierra, en el que se ejecuta software de apoyo a la navegación y supervisión del dron. Este tipo de software se engloba bajo el concepto de Ground Control Station (GCS), que permite la monitorización del estado del vehículo, la configuración de parámetros y la gestión de misiones. En entornos exteriores, existen soluciones de código abierto ampliamente utilizadas, como Mission Planner o QGroundControl, que sirven como referencia y base para el desarrollo de herramientas específicas adaptadas a los requisitos de vuelo en interiores.

En cuanto al software de autopiloto, existen diversas opciones ampliamente reconocidas en la comunidad, entre las que destacan ArduPilot y PX4. En este trabajo se ha optado por ArduPilot, debido a su madurez, flexibilidad y amplia documentación. Para la ejecución de scripts directamente en el autopiloto se utiliza el lenguaje LUA, lo que permite implementar comportamientos y lógicas de control de manera ligera y eficiente. Asimismo, ha sido necesario desarrollar software adicional que se ejecuta tanto en el companion computer como en el ordenador de tierra. Para la comunicación y el control a bajo nivel se ha empleado la librería PyMAVLink, que proporciona acceso directo al protocolo MAVLink y permite una integración flexible entre los distintos componentes del sistema.

Para posibilitar el vuelo autónomo de drones en entornos interiores, se adopta una arquitectura de control jerárquica que puede dividirse en tres niveles: control de bajo nivel, nivel intermedio y nivel alto. Cada uno de estos niveles cumple una función diferenciada dentro del sistema global de navegación y control.

El control de bajo nivel se encarga fundamentalmente de la estabilidad del dron, la estimación básica de su estado y la ejecución de maniobras de emergencia, incluyendo la evitación reactiva de colisiones. Este nivel está implementado principalmente en el software de autopiloto, que ejecuta un filtro de Kalman extendido (EKF) para la estimación del estado del vehículo a partir de sensores inerciales (IMU), sensores de flujo óptico y sensores de rango, típicamente orientados hacia el suelo. La IMU proporciona información de aceleraciones y velocidades

angulares, mientras que el flujo óptico y el sensor de rango permiten estimar el movimiento relativo respecto al entorno y la altura sobre el suelo, respectivamente.

El control de nivel medio del dron es el encargado de la determinación de trayectorias seguras para el vuelo autónomo entre posiciones relativamente próximas. Una misión puede definirse como una secuencia de posiciones de consigna (waypoints) que deben ser alcanzadas por el dron. Finalmente, para el control de alto nivel, responsable de la creación de la misión, usaremos modelos que permiten la navegación visual, esto es, permitir que el dron alcance objetivos especificados visualmente –mediante una imagen del destino –utilizando exclusivamente observaciones de su cámara de a bordo.

2.2.3. Sensores de rango y percepción de proximidad para el control a bajo nivel

Hemos realizado pruebas experimentales con distintos sensores de rango para evaluar su idoneidad en entornos interiores. En particular, se han analizado sensores de tipo LiDAR de corto y medio alcance, como los modelos TFmini-S y TFmini Plus de Benewake, así como sensores de mayor alcance de la familia Lightware, incluyendo los modelos SF11/C y el escáner LiDAR SF45/B.

Sin embargo, para operaciones en interiores se ha optado preferentemente por el uso de sensores Benewake y del sensor SF11/C, debido a su menor complejidad de integración y a su comportamiento más predecible en espacios cerrados.

Los sensores Benewake presentan varias ventajas prácticas: pueden alimentarse directamente desde el sistema del dron sin necesidad de circuitería adicional compleja (como convertidores BEC o divisores de tensión específicos), y proporcionan mediciones estables y regulares de la distancia a obstáculos cercanos. Creemos que este tipo de sensor es muy útil para medir la distancia del dron al suelo u otras superficies debajo. El sensor SF45/B resulta fiable y rápido, con un peso aproximado de 50 gramos, proporciona un escaneo angular amplio (hasta aproximadamente 350 grados) y un alcance máximo de hasta 50 metros, ofreciendo lecturas rápidas y de alta frecuencia del entorno circundante. Finalmente, el SF11/C, a pesar de su mayor alcance nominal, ha mostrado en pruebas experimentales una mayor sensibilidad a fuentes de luz externas, así como oscilaciones y lecturas fuera de rango, lo que limita su fiabilidad en entornos interiores con iluminación variable.

Aunque el software de autopiloto integra mecanismos básicos de evitación de obstáculos, estos suelen estar diseñados como salvaguardas genéricas y, en muchos casos, su implementación interna no es completamente transparente ni fácilmente configurable. En particular, resulta crítico controlar la aceleración o la fuerza de corrección que se aplica al dron cuando se aproxima peligrosamente a superficies u obstáculos. Un comportamiento excesivamente agresivo puede comprometer la estabilidad del vehículo, especialmente en espacios interiores reducidos.

Por este motivo, se ha optado por limitar el uso de las funciones de evitación de colisiones del autopiloto a escenarios extremos, desarrollando en paralelo mecanismos propios de seguridad a bajo nivel. Estos mecanismos actúan de forma preventiva y deben intervenir antes que las protecciones internas del autopiloto. Para ello, se monitorizan directamente las lecturas de los sensores de rango mediante scripts en lenguaje LUA ejecutados en el propio autopiloto, así como

mediante software externo que se ejecuta en el companion computer y se comunica con el autopiloto a través de la librería PyMAVLink.

2.2.4. Flujo óptico para navegación en entornos sin GPS

Para la estimación del movimiento relativo en entornos interiores con GPS denegado, se ha empleado un sensor de flujo óptico Hex HereFlow, plenamente compatible con ArduPilot. El flujo óptico estima el desplazamiento del dron observando el movimiento aparente de patrones visuales entre imágenes consecutivas capturadas por una cámara orientada generalmente hacia el suelo. Combinado con la información de altura proporcionada por un sensor de rango, el flujo óptico permite inferir velocidades horizontales relativas respecto al entorno, lo que resulta esencial para mantener una posición estable en ausencia de GNSS.

Para que las mediciones de flujo óptico sean métricamente consistentes, es necesario realizar un proceso de calibración in-flight. Este calibrado consiste en volar el dron en un entorno exterior donde se dispone de una referencia de posición fiable, típicamente GPS, y correlacionar las medidas de desplazamiento estimadas por el flujo óptico con las velocidades y desplazamientos reales. A partir de esta correlación se obtienen los parámetros de escalado, que permiten convertir el desplazamiento observado en píxeles o unidades relativas en velocidades físicas expresadas en metros por segundo.

Estos parámetros de escalado son fundamentales para que el flujo óptico pueda integrarse correctamente en el EKF del autopiloto y proporcionar estimaciones coherentes del movimiento. Una vez calibrado, el sensor de flujo óptico se convierte en uno de los componentes clave que permiten el vuelo estable y controlado en entornos interiores, donde no se dispone de información de posicionamiento global.

Otro de los sensores que pretendemos analizar y evaluar es el Holybro H-Flow.

2.2.5. Sistemas de posicionamiento para el control intermedio.

Tal y como ya hemos señalado anteriormente, el nivel de control intermedio del dron es el encargado de la determinación de trayectorias seguras para el vuelo autónomo entre posiciones relativamente próximas. Mientras que una misión de mayor alcance puede definirse como una secuencia de posiciones de consigna o waypoints, el nivel intermedio se ocupa de garantizar el desplazamiento seguro del dron entre estos puntos, teniendo en cuenta la geometría del entorno, la presencia de obstáculos y las limitaciones dinámicas del vehículo.

Para este propósito, hemos equipado nuestro dron con una cámara RGB-D frontal, concretamente una Intel RealSense D435i. Este sensor desempeña un papel fundamental en el nivel intermedio de control, ya que permite adquirir información tridimensional del entorno inmediato. A partir de esta información, se pretende construir mapas de ocupación que sirvan como base para la planificación de trayectorias y el replanteo local en tiempo real.

En segundo lugar, se ha incorporado un sistema de posicionamiento externo proporcionado por Marvelmind Robotics, que puede considerarse un equivalente funcional de un “GPS de interiores”. A diferencia de otros sistemas basados en radiofrecuencia, como UWB, Marvelmind

emplea tecnología de ultrasonidos y estima las distancias mediante el Tiempo de Vuelo (Time of Flight, ToF) de señales acústicas.

El ecosistema Marvelmind consta de tres componentes principales. En primer lugar, las balizas estacionarias beacons, que se instalan en posiciones fijas del entorno, típicamente en paredes o techos. Estas balizas pueden emitir o recibir pulsos ultrasónicos y cooperan entre sí para autocalibrar sus posiciones relativas. Una vez finalizada la fase inicial de detección de balizas en posiciones fijas y su posición relativa, estas balizas en posiciones fijas pasan a configurarse como receptores. En segundo lugar, hay una baliza móvil (hedgehog), que se monta sobre el dron y actúa como emisor de los pulsos ultrasónicos. Finalmente, un router central recopila las marcas temporales de emisión y recepción, calcula las distancias y estima la posición del hedgehog en un sistema de coordenadas cartesianas.

El sistema Marvelmind permite configuraciones tanto en dos dimensiones como en tres dimensiones. Para el posicionamiento en 2D, es necesario que el hedgehog sea detectado por al menos dos balizas estacionarias, mientras que para obtener una estimación completa en 3D —incluyendo la altitud— se requiere la detección simultánea por al menos tres o cuatro balizas. En este trabajo, el sistema ha sido validado inicialmente en condiciones estáticas y se encuentra actualmente en fase de evaluación durante vuelos reales, donde pueden aparecer efectos adversos como oclusiones de línea de visión o interferencias acústicas debidas al ruido generado por los motores y hélices del dron.

2.2.6. Control a alto nivel, navegación visual

Para el control a alto nivel, pretendemos aplicar la estrategia de navegación visual presentada en el trabajo (“ViNT: A Foundation model for Visual Navigation”, D. Shah et al., Proc. 7th Conf. Robot Learning, 2023). El objetivo de esta navegación visual propuesta en ViNT es permitir que el dron alcance objetivos especificados visualmente —mediante una imagen del destino— utilizando exclusivamente observaciones de su cámara a bordo. A diferencia de los enfoques clásicos de navegación autónoma, ViNT prescinde explícitamente de mapas geométricos previos, etiquetas semánticas manuales o sistemas de localización global como el GPS. En su lugar, el sistema aprende directamente, a partir de grandes volúmenes de datos reales, qué acciones son viables en un entorno dado, internalizando de forma implícita las affordances de navegación: es decir, qué regiones del espacio son transitables, cuáles están bloqueadas y qué trayectorias resultan físicamente plausibles para el dron. Si bien durante el proyecto hemos aprendido nuestros propios modelos para esta navegación visual, pretendemos también evaluar y utilizar el modelo de ViNT.

Desde el punto de vista arquitectónico, ViNT es un modelo basado en Transformers, con aproximadamente 31 millones de parámetros, diseñado específicamente para ser ejecutado de forma eficiente en robots con recursos computacionales limitados. El modelo emplea codificadores visuales EfficientNet-B0 para procesar tres tipos de información: la observación visual actual del robot, un contexto temporal compuesto por las cuatro imágenes anteriores, y una imagen objetivo que representa el destino deseado. Estas representaciones se fusionan mediante un mecanismo de atención que permite al modelo razonar sobre la relación entre el estado actual y la meta visual, produciendo como salida tanto una estimación de la distancia temporal (número pasos de control) hasta el objetivo, como una secuencia corta de acciones

futuras en forma de waypoints relativos. Estos waypoints son desplazamientos relativos en el plano (Δx , Δy), además del coseno y del seno del ángulo yaw. Estos waypoints son interpretados por el controlador de bajo nivel, que se encarga de traducirlos en comandos de movimiento.

Aunque ViNT es capaz de generar comportamientos locales de navegación efectivos, su horizonte de planificación directa es limitado. Para abordar tareas de navegación a larga distancia, el sistema se complementa con una memoria episódica representada mediante un grafo. En este grafo, cada nodo corresponde a una observación visual almacenada durante experiencias previas —por ejemplo, imágenes capturadas en vuelos o recorridos anteriores—, y las aristas representan transiciones viables entre dichas observaciones.

En el marco de este proyecto pretendemos la construcción de este grafo de manera incremental. A medida que el robot explora el entorno, se añaden nuevos nodos correspondientes a imágenes observadas, y se establecen conexiones entre nodos cuando el robot ha recorrido físicamente ese trayecto o cuando el propio modelo predice que una imagen es alcanzable desde otra en pocos pasos. Dado que este grafo puede crecer rápidamente, especialmente en entornos extensos o durante exploraciones prolongadas, se aplican técnicas de poda que eliminan nodos redundantes o conexiones triviales, manteniendo una representación compacta y eficiente.

En las pruebas que hemos realizado se graba primero un vídeo del escenario. A partir de este vídeo, y utilizando el modelo entrenado, se genera un grafo de navegación cuyos nodos almacenan imágenes representativas. Cuando inicia la navegación, el agente localiza su posición dentro del grafo y, mediante el algoritmo de Dijkstra, calcula la ruta óptima desde el nodo actual hasta el nodo objetivo (previamente especificado). A continuación, el agente avanza siguiendo la ruta estimada, guiándose por las distancias relativas entre su observación actual y la imagen del siguiente nodo, hasta alcanzar el destino.

2.2.7. Aplicación de la solución propuesta a drones pequeños y soluciones comerciales cerradas

En drones de menor tamaño y que corresponden a soluciones cerradas (tipo Parrot, Tello o similares), si bien estos drones están equipados con una cámara frontal (visión monocular), no es posible la incorporación de sensores como la que hemos presentado en las secciones anteriores (sensores de rango o cámara RGBD), o sistemas de posicionamiento como los descritos anteriormente. El modelo visual descrito en la sección anterior no garantiza por sí solo evitación de obstáculos finos. Por este motivo, hemos creado modelos que permiten la estimación de profundidad a partir de visión monocular. Hemos creado una red tipo HydraNet ligera (MobileNetV2 como encoder y Light-Weight RefineNet como decoder) para estimación de profundidad monocular en tiempo real (y, adicionalmente, segmentación semántica), entrenada sobre NYU Depth V2. Hemos hecho una validación tanto cualitativa como cuantitativa de nuestro modelo con resultados muy satisfactorios. En la validación cualitativa del comportamiento del modelo hemos empleado imágenes reales capturadas por un dron Tello, observando resultados “buenos” incluso con baja iluminación y calidad degradada, especialmente en el mapa de profundidad. Con esta pieza, el sistema híbrido queda claro: mientras el dron se desplaza entre nodos del grafo episódico descritos en la sección anterior (navegación visual topológica), el estimador de profundidad monocular permite una evitación de obstáculos básica reactiva.

3. Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en aterrizajes de emergencia en plataformas marinas

3.1 Introducción

El sector de las energías renovables marinas, y en particular el de la eólica offshore, está experimentando un crecimiento significativo, con proyectos cada vez más extensos y alejados de la costa. Esta expansión trae consigo desafíos inherentes a la inspección y el mantenimiento de las infraestructuras, que tradicionalmente dependen de personal técnico y embarcaciones de apoyo. Los métodos convencionales resultan costosos, complejos logísticamente y, en ocasiones, limitados por las condiciones meteorológicas, lo que subraya la necesidad de soluciones innovadoras que mejoren la eficiencia, reduzcan los tiempos de inactividad y garanticen la seguridad de las operaciones.

En este contexto, este demostrador plantea la integración de UAVs como una herramienta fundamental para la inspección y el mantenimiento de aerogeneradores marinos. Sin embargo, el despliegue de drones en entornos offshore presenta una complejidad considerable. La principal dificultad radica en la realización de maniobras críticas como el despegue y el aterrizaje sobre plataformas flotantes de aerogeneradores o buques de apoyo. Estas estructuras están sujetas a movimientos constantes y de gran amplitud debido a las condiciones dinámicas del mar (oleaje, viento), a las que se suman las cargas aerodinámicas generadas por los propios aerogeneradores en el caso de las plataformas fijas o flotantes. Las limitaciones de autonomía de los UAVs actuales, dictadas principalmente por la capacidad de sus baterías, impiden que despeguen desde tierra para operar en zonas offshore distantes, requiriendo su transporte y operación directa desde embarcaciones o plataformas.

Para superar estos desafíos, este piloto se enfoca en el desarrollo de una tecnología que facilite el despegue y aterrizaje seguro de UAVs en condiciones complejas. La propuesta central es la creación de una plataforma de aterrizaje y despegue portátil que incorpore un sistema mecánico-robótico de compensación de movimiento. Este sistema tiene como objetivo principal estabilizar la superficie de operación del dron, minimizando los efectos de los movimientos inducidos por el entorno marino.

Como primera fase de este piloto, la Universidad de A Coruña (UDC) es la encargada del desarrollo de un modelo predictivo del movimiento de artefactos flotantes, basado en mediciones realizadas en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos del CITENI. Las predicciones alimentan el sistema de compensación de la plataforma de aterrizaje diseñada por ITG, permitiendo anticipar los movimientos y ajustar la superficie de manera proactiva. Además, la información del modelo puede ser integrada con el sistema de control del dron, ofreciendo la capacidad de tomar decisiones informadas, como abortar un aterrizaje en caso de condiciones adversas.

Aeroganp

El objetivo final es mejorar significativamente la operatividad y la seguridad de los drones, extendiendo su capacidad de uso en una variedad de escenarios complejos y contribuyendo a la optimización de las operaciones en las granjas eólicas marinas.

3.2 Modelo predictivo del movimiento de artefactos flotantes

3.2.1 Material y método

En primer lugar, el piloto requiere caracterizar y reproducir los movimientos que pueden anticiparse bajo condiciones operativas reales. La forma más directa y fiable de predecir estos movimientos es mediante ensayos a escala en un canal de olas, como el del Centro de Investigación en Tecnologías Navales e Industriais (CITENI) de la Universidade da Coruña (véase Fig. 1).



Fig.1: Canal de olas del CITENI

Se han realizado dos campañas de ensayos:

- 1) En una primera etapa, se emplea un modelo a escala 1:30 de un buque de apoyo a la eólica offshore, considerando las futuras condiciones reales de uso de la tecnología. Se ha seleccionado un buque de transporte de personal de 32 metros de eslora como referencia (véase Fig. 2).



Fig. 2: Buque de transporte de personal utilizado como caso de prueba (Izquierda: <https://n-o-s.eu/the-fleet/m-v-wind-supplier/>)

- 2) En una segunda etapa, se fabricó mediante impresión 3D un modelo a escala 1:30,4 del buque piloto Mar Profundo de INESC-TEC (Fig. 3), en el que se llevarán a cabo las pruebas de validación finales de la tecnología. Este modelo se ensayó bajo condiciones meteoceánicas representativas de la costa del norte de Portugal, donde se prevé realizar dichas pruebas.



Fig. 3: Buque piloto Mar Profundo

Aeroganp

En ambas campañas experimentales se analizó el comportamiento de los buques en olas irregulares con rumbos de 0, 90 y 180° (oleaje de popa, de través y de proa, respectivamente). Se midieron los movimientos en los seis grados de libertad de los modelos mediante un sistema de captura de movimiento QUALISYS, compuesto por tres cámaras para seguir las trayectorias de cuatro marcadores de infrarrojos rígidamente fijos a los modelos (véase la Fig. 2-derecha y la Fig. 3-derecha). Además, los movimientos angulares también se registraron mediante una Unidad de Medición Inercial (IMU). La frecuencia de adquisición de datos durante los ensayos fue de 100 Hz, y la duración de los ensayos fue equivalente a 77 minutos a escala real.

Los parámetros de ola utilizados en los experimentos con modelos a escala se seleccionaron a partir de los datos ambientales históricos de la boya SeaWatch “Villano-Sisargas” y de los datos del modelo meteorológico del punto SIMAR 1044064. Ambos conjuntos de datos están a libre disposición a través del portal Portus de Puertos del Estado, organismo dependiente del Ministerio de Transportes de España. El primer conjunto de datos se eligió para representar condiciones operativas realistas, ya que la boya “Villano-Sisargas” se encuentra dentro del área designada para el futuro proyecto del parque eólico Nordés. El segundo conjunto de datos (correspondiente al punto SIMAR 1044064, situado a unos 70 km de la costa de Oporto) se seleccionó como representativo de la costa norte de Portugal. Según los diagramas de dispersión del oleaje obtenidos a partir de datos medidos y modelados referentes a los últimos 25 años, las olas más frecuentes en ambos puntos seleccionados presentaban alturas significativas entre 1 y 3.5 m y períodos de pico entre 9 y 12 s. En base a esta información y a la curva de limitación del generador de olas del canal de ensayos del CITENI, se elaboró la matriz de ensayos (Tab. 1), que se utilizó en ambas campañas experimentales. Para cada una de las tres direcciones de propagación del oleaje se realizaron un total de 12 ensayos —uno por cada combinación de 3 períodos de pico (9, 10 y 10.5 s) y 4 alturas significativas de ola (1.5, 2, 2.5 y 3 m).

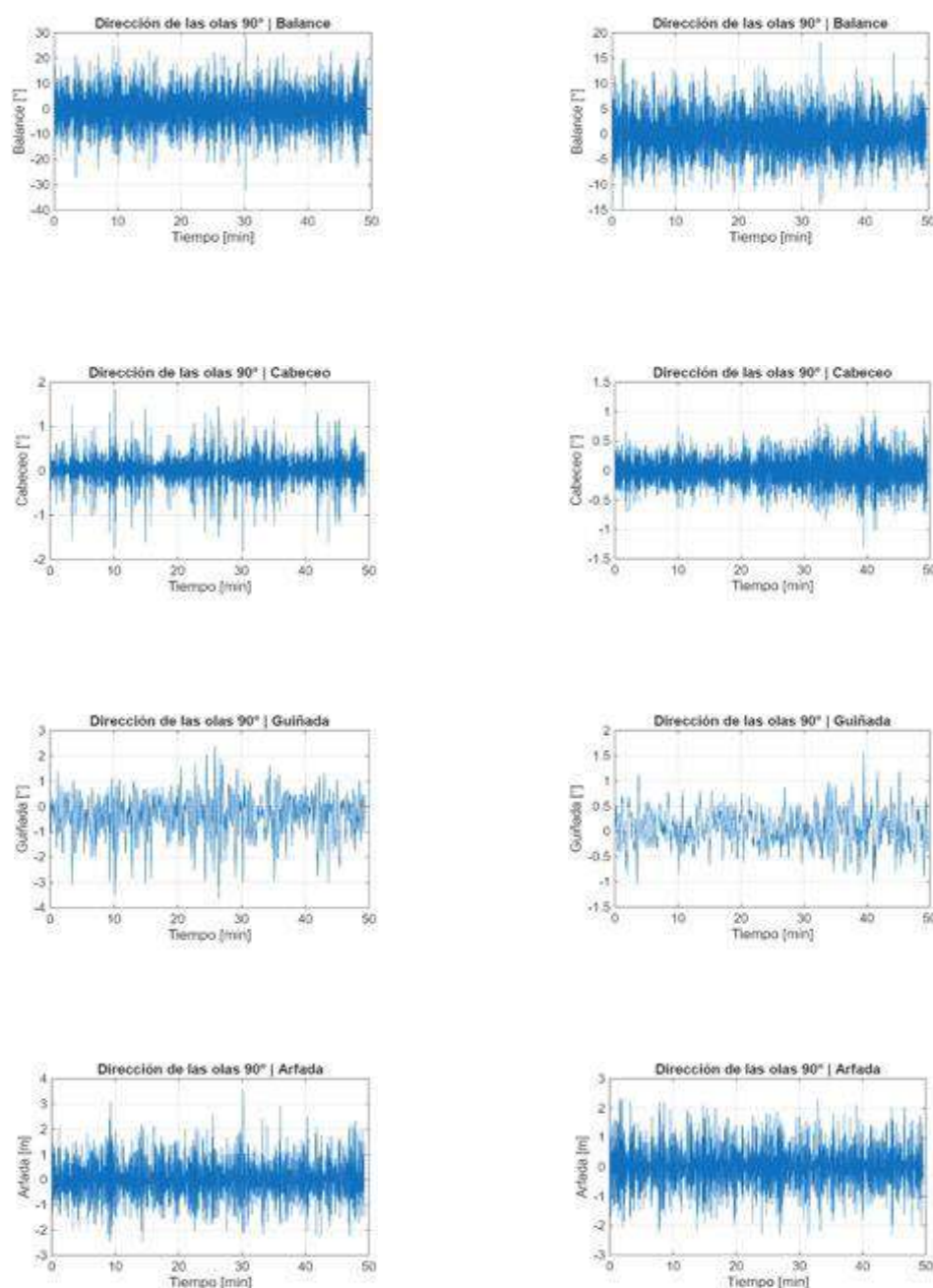
En caso de que se considere aplicar esta tecnología en otras localizaciones distintas de la zona Galicia–Norte de Portugal, que constituye el ámbito de estudio del proyecto AEROGANP, sería recomendable disponer de los datos meteoceánicos específicos de la nueva región y llevar a cabo los ensayos a escala correspondientes. Alternativamente, podría desarrollarse un modelo predictivo —por ejemplo, basado en técnicas de aprendizaje automático— utilizando los datos obtenidos en el marco del proyecto AEROGANP, con el fin de extrapolar el comportamiento del sistema a otras condiciones operativas.

Tabla 1 Matriz de ensayos (olas a escala real)

	IR11	IR12	IR13	IR21	IR22	IR23	IR31	IR32	IR33	IR41	IR42	IR43
Periodo T [s]	9.0	10.0	10.5	9.0	10.0	10.5	9.0	10.0	10.5	9.0	10.0	10.5
Altura de ola H [m]	1.5			2.0			2.5			3.0		

3.2.2 Resultados

Un ejemplo de las series temporales de movimiento se muestra en la Fig. 4, presentando en paralelo los resultados de ambas campañas experimentales en las condiciones más severas probadas (caso de ensayo IR43), donde la altura significativa de ola fue de 3 m y el período pico de la ola fue de 10,5 s. Todas las series temporales fueron normalizadas y son relativas a la condición inicial y estática del buque flotando en aguas tranquilas, antes de la aparición de las olas.



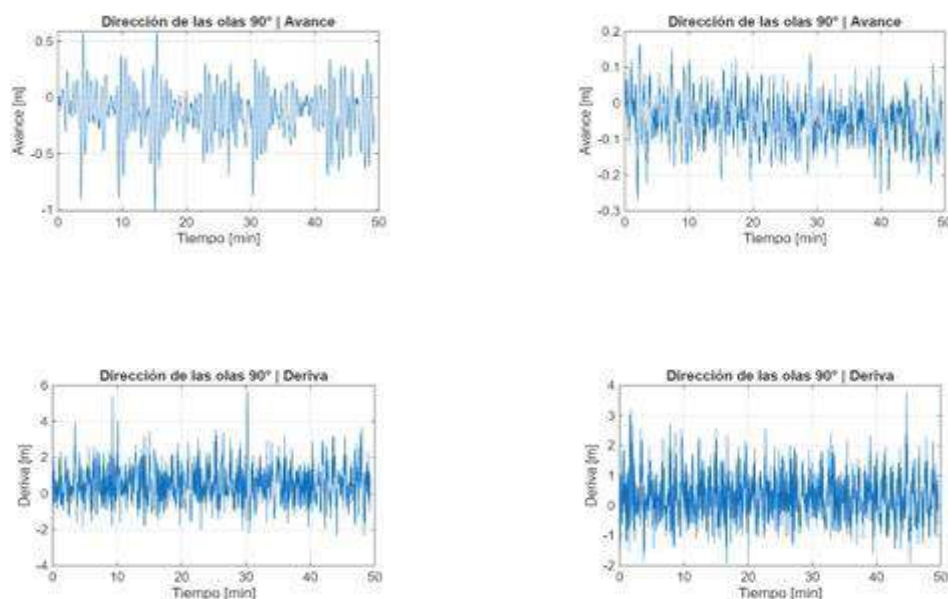


Figura 4 Ejemplo de las series temporales de movimiento; izquierda – resultados de la primera campaña experimental, derecha – resultados de la segunda campaña experimental

Además de las series temporales, se llevó a cabo un análisis estadístico de los movimientos oscilatorios de los dos buques ensayados, y los resultados correspondientes al ensayo IR43 (para las tres direcciones de incidencia de las olas) se muestran en la Tabla 2. A partir de esta tabla, puede observarse que las mayores amplitudes de movimiento, como era de esperar, se producen para ambos buques en el movimiento de balanceo en el caso de olas de través. Además, el movimiento de balanceo en el caso del buque de suministro offshore es casi el doble del experimentado por el Mar Profundo en las mismas olas, lo que también podría considerarse un resultado esperable, teniendo en cuenta los tipos de casco de ambos buques. Por otro lado, no es infrecuente que los buques de suministro offshore dispongan de dispositivos activos de amortiguamiento de balanceo que, en la práctica, reducirían de forma significativa las amplitudes del balanceo. En cuanto a los movimientos de cabeceo, las amplitudes son naturalmente más altas cuando las olas inciden desde la proa o la popa de los buques, y el Mar Profundo experimenta, en general, un mayor movimiento de cabeceo. Por otro lado, el buque de suministro offshore experimenta un mayor movimiento de arfada.

Tabla 2 Valores estadísticos de los movimientos de balanceo, cabeceo y arfada a escala real de los dos buques ensayados.

Dirección de olas	Campaña experimental	Balance [°]		Cabeceo [°]		Arfada [m]	
		Medio de los picos	Máximo de los picos	Medio de los picos	Máximo de los picos	Medio de los picos	Máximo de los picos

0°	1°	0.546	2.382	2.920	8.188	1.054	3.086
	2°	0.194	0.970	3.980	15.355	0.828	2.635
90°	1°	8.296	32.269	0.237	1.838	0.861	3.587
	2°	4.445	18.191	1.202	2.411	0.800	2.355
180°	1°	0.586	2.510	2.851	9.611	1.067	3.293
	2°	0.198	1.076	3.978	12.801	0.744	2.705

3.3 Tecnología de compensación de movimiento

3.3.1 Material y método

El desarrollo del demostrador se ha estructurado en varias fases, combinando el análisis del estado del arte, la selección de componentes, el desarrollo de software y el diseño mecánico. A continuación, se detalla el material y método empleado.

Selección de la Plataforma de Compensación de Movimientos

La fase inicial consistió en un análisis exhaustivo del estado del arte y un estudio de las soluciones comerciales disponibles en el mercado para plataformas de movimiento. Este estudio permitió identificar los sistemas más adecuados en términos de funcionalidad, rendimiento y capacidad para el proyecto.

Se optó por la plataforma PS-6TL-350 de Motion Systems, un sistema de movimiento paralelo conocido técnicamente como plataforma Stewart. Este tipo de plataforma se caracteriza por sus seis grados de libertad (6-DOF), lo que le permite emular de forma altamente realista los movimientos complejos que experimenta un buque en el mar. Las capacidades de movimiento incluyen:

- Traslaciones: En los ejes X, Y y Z (Surge, Sway, Heave).
- Rotaciones: En Roll (cabeceo), Pitch (balanceo) y Yaw (guiñada)

Las especificaciones técnicas de la plataforma PS-6TL-350 son las siguientes:

- Capacidad de carga: 350 kg
- Heave (desplazamiento vertical): -0.17 m, +0.19 m
- Pitch (inclinación): -19.9°, +18.1°
- Roll (balanceo): ±20.6°
- Yaw (guiñada): ±27.8°
- Surge (desplazamiento longitudinal): -0.3 m, +0.27 m
- Sway (desplazamiento lateral): ±0.26 m
- Peso de la plataforma: 390 kg

La plataforma Stewart, tradicionalmente utilizada en simuladores de vuelo o conducción, ha extendido su aplicación a la industria para el desarrollo de plataformas autoestabilizadas en entornos dinámicos e inestables. Su robustez y precisión la hacen ideal para el caso de uso de este demostrador, además de su potencial para el

entrenamiento de pilotos en aterrizajes complejos. La Figura X muestra la configuración de la plataforma con un dron.



Figura 2 Configuración de la plataforma de compensación de movimientos con un dron

Desarrollo de Software y Control

Con el fin de solventar la espera por la entrega de la plataforma física, se adquirió un controlador hardware de Qubicsystem (Motion Systems) para emular la conectividad y acelerar el desarrollo del software. Este controlador, permitió al equipo familiarizarse con el entorno de desarrollo y las herramientas proporcionadas por el fabricante, incluyendo el software ForceSeatPM.

Las actividades de desarrollo de software incluyeron:

- Lectura y replicación de movimientos: Se desarrolló un programa capaz de leer archivos Excel proporcionados por la UDC. Estos archivos contenían series temporales que representaban el comportamiento inercial de un barco en el mar, lo que permitió replicar los movimientos en el entorno virtual.
- Prueba inversa de compensación: Se implementó una lógica para contrarrestar los movimientos leídos, invirtiendo los datos (cambiando su signo), para simular la capacidad de la plataforma de estabilizar una superficie.
- Exploración de rangos de movimiento: Se añadió un modo para ejecutar los seis movimientos de la plataforma de forma individual, permitiendo visualizar los máximos y mínimos alcanzables en cada eje.
- Integración de IMU en tiempo real: Se abordó la integración de datos de una IMU en tiempo real. Tras una evaluación exhaustiva, se optó por el modelo x-IMU3, el cual cumplía con los requisitos de calidad definidos. Se desarrolló un programa específico para comunicar la IMU con la plataforma y realizar la compensación de movimientos de forma dinámica. La Figura 3 muestra el set-up para la validación con una IMU externa.

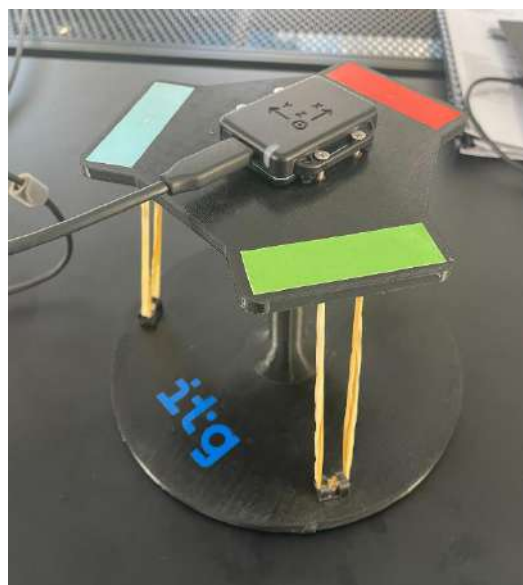


Figura 3 Dispositivo creado para ayudar en la configuración y validación del algoritmo de corrección en tiempo real

- Calibración y referencia cero: Para establecer un eje de referencia preciso, se implementó un proceso de calibración donde el dispositivo IMU se fijó a una tabla junto a una representación gráfica de la plataforma, asegurando que el Pitch estuviera calibrado a cero.
- Interfaz gráfica de usuario: Se diseñó una interfaz intuitiva para seleccionar los diferentes modos de operación y visualizar el estado del sistema. La Figura 4 muestra esta interfaz.



Figura 4 Interfaz creada para la validación del algoritmo de procesado y los datasets generador por la UDC

- Modos de funcionamiento auxiliares: Se implementaron funcionalidades adicionales, incluyendo un generador de movimientos basado en ondas

sinusoidales a través de los diferentes ejes y un modo de captura y grabación de los movimientos de una IMU externa para su posterior reproducción.

Diseño Mecánico y Estructural

El diseño mecánico se centró en garantizar la durabilidad y funcionalidad de la plataforma en un entorno marino hostil, prestando especial atención a:

- Protección contra la corrosión: Se diseñaron componentes mecánicos considerando la exposición al salitre y la humedad
- Sistema de soportes: Se desarrolló un sistema de soportes para la plataforma y el dron, diseñado para soportar el peso y permitir el balanceo de la plataforma. La Figura 5 ilustra este diseño.

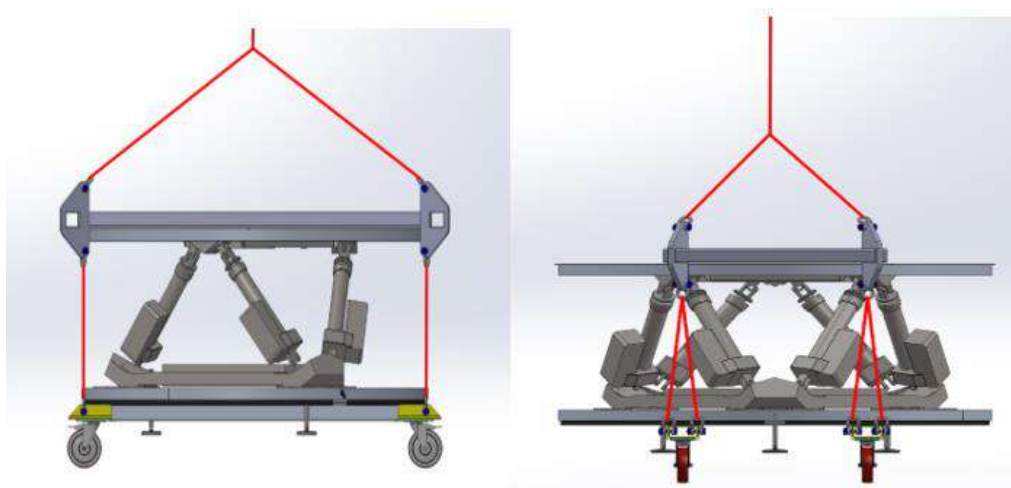


Figura 5 Diseño del sistema de soportes para la plataforma

- Envolvente: Se optó por una lona protectora que permite el movimiento de la plataforma mientras la protege de los elementos. La Figura 6 muestra el diseño de la envolvente.



Figura 6 Diseño de la envolvente de la plataforma

Aeroganp

- Transporte y movilidad: Se diseñaron soportes específicos para izar la estructura completa con una grúa y se integró un sistema de ruedas para facilitar el desplazamiento ágil de la plataforma en tierra. Las Figuras 7 y 8 muestran la plataforma con la envoltura y los soportes fabricados.



Figura 7 Plataforma de compensación de movimientos junto con la envoltura fabricada



Figura 8 Envoltura de la plataforma (izquierda) y soportes para la plataforma (derecha)

- Soporte IMU profesional: Para optimizar la configuración y calibración, se diseñó un soporte profesional para sujetar la IMU, con un código de colores en los puntos de la plataforma para una relación intuitiva. La Figura 3 muestra este dispositivo.

Fases de Prueba y Validación

El plan de validación de la tecnología incluye diversas etapas. La tecnología se probará inicialmente en un entorno terrestre. Un sistema robotizado recreará los movimientos esperados en condiciones de mar y viento simuladas, permitiendo verificar la capacidad

Aeroganp

de la plataforma móvil para compensar dichos movimientos y habilitar las maniobras del dron.

Paralelamente, el sistema se probará en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos (CITENI) de la UDC, donde se simularán diversos estados de mar para verificar la capacidad de compensación de movimientos en un entorno controlado.

INESC-TEC proporcionará datos de IMUs del buque "Mar Profundo", posicionado en la zona offshore de granjas eólicas en la costa portuguesa. Esto permitirá que las pruebas de validación se realicen en las condiciones más realistas posibles.

Finalmente, la tecnología se implantará y validará en buques de apoyo offshore en las zonas costeras de Galicia y en los test-sites de INESC-TEC en la costa portuguesa (Agaçadoura y Viana do Castelo), utilizando una caracterización meta-oceánica completa para alimentar los modelos de predicción.

3.3.2 Resultados

El trabajo realizado hasta la fecha ha permitido alcanzar importantes hitos en el desarrollo de este demostrador, reflejando un progreso sustancial desde la concepción inicial del proyecto. La estrategia de adquirir un controlador hardware de forma temprana, junto con el uso del software ForceSeatPM, resultó fundamental para agilizar la fase de desarrollo de los algoritmos de control antes de la recepción física de la plataforma. Este enfoque permitió una familiarización profunda con el entorno de desarrollo y la creación de programas esenciales para la lectura, replicación e inversión de datos de movimiento de buques, información crítica generada por la UDC, que sentó las bases para la futura lógica de compensación.

Una vez establecidos estos cimientos de software, se logró implementar con éxito programas capaces de ejecutar los seis grados de libertad de la plataforma, lo que facilitó la verificación detallada de sus rangos de movimiento. La integración del sistema x-IMU3 en tiempo real fue otro hito clave, permitiendo la compensación dinámica de movimientos y demostrando eficazmente el concepto principal de contrarrestar la inestabilidad.

La recepción de la plataforma física trajo consigo un desafío inesperado: la observación de movimientos escalonados en lugar de continuos, un inconveniente no detectado durante la fase de emulación. No obstante, este problema crítico fue resuelto mediante ajustes de configuración precisos en la aplicación ForceSeatPM, garantizando así un movimiento suave y continuo, indispensable para el funcionamiento óptimo del sistema.

Paralelamente al desarrollo de la lógica de movimiento, se diseñó e implementó una interfaz gráfica de usuario intuitiva (ver Figura). Esta interfaz es crucial para la interacción del operador, permitiendo una selección sencilla entre los diversos modos de operación, tales como la lectura de archivos, la simulación IMU, los modos inversos, el generador sinusoidal y la grabación de IMU, lo que optimiza la configuración y el control del sistema. Además, se desarrollaron herramientas auxiliares de funcionamiento y calibración, incluyendo un generador de movimientos sinusoidales para pruebas controladas y una capacidad de captura y grabación de movimientos de una IMU externa, esencial para la reproducción y análisis posterior de datos. Para

Aeroganp

asegurar una calibración precisa y una interacción visual intuitiva, se creó un soporte profesional para la IMU y se implementó un código de colores en la plataforma.

Finalmente, en el ámbito del diseño mecánico, se completó la fase de diseño detallado de la envolvente protectora de la plataforma, concebida para resistir las rigurosas condiciones marinas, particularmente la exposición al salitre, y para salvaguardar los componentes internos. Asimismo, se diseñaron y fabricaron los sistemas de soporte para la plataforma y el dron, junto con un sistema de ruedas y soportes específicos que facilitan el transporte y el izado de la estructura completa (ver Figuras). Estos resultados combinados evidencian la viabilidad técnica de la propuesta y un progreso considerable en la preparación del demostrador para sus próximas fases de validación en entornos simulados y reales.

3.3.3 Conclusiones

El demostrador de tecnologías dron con aplicación en aterrizajes de emergencia en plataformas marinas representa un avance significativo en la aplicación de sistemas autónomos y robótica para el sector de las energías renovables offshore. A través del trabajo realizado, se ha logrado desarrollar una plataforma de aterrizaje y despegue para UAVs con capacidad de autoestabilización, diseñada específicamente para operar en los desafiantes entornos marinos.

La selección de la plataforma Stewart PS-6TL-350, con sus seis grados de libertad, ha proporcionado una base robusta para simular y compensar los complejos movimientos de las plataformas y buques en el mar. La capacidad de emular el comportamiento de un buque en condiciones marítimas reales convierte a este sistema en una herramienta indispensable para el desarrollo y la validación de la tecnología.

El desarrollo de software, que incluyó desde la lectura e inversión de datos de movimiento hasta la integración de IMUs en tiempo real y la creación de una interfaz de usuario intuitiva, ha permitido abordar los retos de control y precisión inherentes a la compensación de movimiento.

Además, el diseño mecánico de la envolvente y los sistemas de soporte, pensando en la protección contra la corrosión y la facilidad de transporte, asegura la durabilidad y la operatividad de la plataforma en el exigente ambiente marino.

La integración de un modelo predictivo del movimiento de las plataformas flotantes no solo optimizará las maniobras de aterrizaje al anticipar perturbaciones, sino que también permitirá al sistema de control del dron tomar decisiones informadas, mejorando de forma significativa la seguridad y la eficiencia de las operaciones. Esto es fundamental para habilitar el uso generalizado de UAVs en la inspección y mantenimiento de infraestructuras críticas offshore.

En definitiva, este piloto no solo aborda una necesidad crítica en la industria eólica marina al permitir inspecciones y mantenimientos más seguros y eficientes, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la robótica marina y los sistemas autónomos. La próxima fase de pruebas exhaustivas en entornos simulados y reales será crucial para validar plenamente el potencial de esta tecnología.

ANEXOS

ANEXO I.- Piloto de tecnologías basadas en drones con aplicación en monitorización aérea

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los equipos empleados

Plataforma	Sensor empleado	Especificaciones
Estación Láser (TLS) Trimble SX12		Campo de visión: 360°x300° Frecuencia de medición (kHz): 26,6 Precisión de posicionamiento 3D (mm): 2,5 a 100 m Ruido de medición: 2,5 mm a 300 m (superficies reflectantes entre el 18% y el 90%) Precisión angular: 5"
UAS Mavic 3 enterprise	Cámara RGB CMOS 4/3"	Ángulo de visión (DFOV): 84° Distancia focal: 24 mm (equivalente en formato 35 mm). Apertura: f/2.8 – f/11 Velocidad de obturación: 8 s – 1/2000 s (mecánico) Sensibilidad ISO: 100-6400
UAS DJI Matrice 300 RTK	Sensor LiDAR DJI Zenmuse L1	1. Patrón de escaneo: Repetitivo y no repetitivo Campo de visión: 70,4°x 4,5°(repetitivo) 70,4°x 77,2° (no repetitivo) Tasa de puntos efectiva: 240000 puntos/s Precisión IMU: Balanceo/cabeceo: 0,05°, guiñada: 0,3° Nº retornos máximos: 3
	Ecosonda batimétrico Echologer ECT400	Frecuencia acústica (Khz): 450 Ancho del haz: 5° Cónico Ancho del pulso de transmisión (µsec): 10 - 200 Tasa de muestreo (Khz): 100 Resolución de la columna de agua (mm): > 7,5 Resolución del rango del altímetro (mm): <1 Interfaz de salida digital: RS-232, RS-485, RS-422
ROV Chasing M2	Cámara GoPro HERO10 Black	Dimensiones (mm): 55 x 71 x 33,6 Peso (g): 153 Sensor: CMOS 1/2,3" Resolución: 4176 x 5568 px Distancia focal: 3 mm (equivalente a 15 mm en 35 mm) Pantallas: LCD táctil de 2,27" (trasera), LCD de 1,4" (delantera) Conectividad: Wifi, Bluetooth, USB Tipo C Profundidad máxima: 100 m Alcance horizontal máximo (cable): 300 m
USV CHCNAV Apache 4	Ecosonda batimétrico CHCNAV HQ-400	Rango de profundidad: 0.2 – 150 m Cobertura de banda (swath): 130° Número de haces: 512 Frecuencia: 400 kHz ± 20 kHz Tasa de pulsos: Hasta 60 Hz Resolución angular (across x along): 1.6° x 1.8° Longitud de pulso: 20 µs – 2 ms Integración: RTK GNSS + IMU + sensor de velocidad del sonido Comunicación: 2.4 GHz y 4G LTE Alimentación: 4 x baterías Li-ion (22.2 V, 28 Ah) Autonomía: hasta 6 h Velocidad máxima: 5 m/s Protección: IP67 (resistente al polvo y al agua)

Tabla 2. Ventajas y limitaciones de los sensores y tecnologías testeadas aéreas

<i>Técnica</i>	<i>Ventajas principales</i>	<i>Limitaciones</i>
DAP-UAV	<p>Precisión subdecimétrica en planimetría y altimetría</p> <p>Coste bajo</p> <p>Resolución espacial alta</p> <p>Textura detallada</p> <p>Implementación sencilla, tecnología y software de procesamiento consolidado</p> <p>Aplicación</p> <ul style="list-style-type: none"> En superficies bien iluminadas Adecuado para análisis topográficos y estructurales complejos 	<p>Condicionantes. Dependiente de las características de la superficie (textura, rugosidad, etc.)</p> <p>Calidad disminuye en superficies reflectantes o con oclusiones</p> <p>Requiere GCPs para garantizar precisión subdecimétrica</p>
LiDAR-UAV	<p>Precisión subdecimétrica en planimetría y altimetría</p> <p>Coste medio</p> <p>Densidad de puntos uniforme.</p> <ul style="list-style-type: none"> Aplicación en elementos con baja Independiente de la iluminación ambiental. En elementos con baja textura y sombras debidas a relieves complejos Adecuado para análisis topográficos y estructurales complejos. 	<p>Condicionantes. Limitado en áreas verticales o de geometría compleja</p> <p>Menor precisión que la fotogrametría en alturas bajas.</p> <p>Coste mayor en la toma de datos y procesamiento que la fotogrametría</p> <p>Textura menor calidad que la fotogrametría</p> <p>Requiere calibración cuidadosa del sistema IMU-GNSS</p>

En conjunto, el estudio confirma que la integración de estas tecnologías permite desarrollar estrategias de monitoreo multiescala, optimizando recursos y garantizando información precisa según el contexto y los objetivos del proyecto. Esta experiencia sienta las bases para futuras aplicaciones en gestión de infraestructuras, conservación del patrimonio y análisis ambiental, aportando criterios claros para la selección de tecnologías en función de la complejidad geométrica y las condiciones del entorno.

Tabla 3. Ventajas y limitaciones de los sensores y tecnologías testeadas subacuáticas

Técnica	Ventajas principales	Limitaciones
SBES - UAV	<p>Precisión decimétrica en altimetría, precisa extrapolación de los puntos discretos.</p> <p>Implementación rápida</p> <p>Aplicación</p> <p>Zonas someras o confinadas como lagos o de difícil acceso para emplear batimetría convencional tripulada</p>	<p>Condicionantes.</p> <ul style="list-style-type: none"> Profundidad de registro 100 m máximo Sensible a vegetación acuática y algas, turbulencias y viento Menor autonomía por peso y resistencia hidrodinámica <p>Coste alto</p> <p>Precisión limitada en paredes o pendientes pronunciadas. Afectada por reflexiones múltiples y ángulos oblicuos</p> <p>Densidad de puntos baja</p>
ROV multicámara	<p>Precisión subdecimétrica en zonas de reducida extensión ya que la limitación son los GCPs para el ajuste del modelo</p> <p>Coste bajo</p> <p>Sensores configuración de número y posición adaptable. Captura simultánea multivista.</p> <p>Aplicación</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuando se requiere muy alta resolución como en inspección de estructuras cuando la precisión no es determinante En extensiones reducidas o de escasa profundidad donde no es posible el empleo de métodos convencionales 	<p>Condicionantes.</p> <ul style="list-style-type: none"> Alcance máximo 300 m (en función de la longitud del cable) Difícil maniobrabilidad ante corrientes Alta sensibilidad a la turbidez y la refracción Necesidad de GCPs para la orientación absoluta para eliminar deformaciones globales <p>Procesamiento presenta problemas de correlación y alineamiento entre imágenes</p> <p>Radiometría dependiente de la calidad del agua e iluminación, que disminuye con la profundidad</p>
MBES - USV	<p>Precisión submétrica</p> <p>Implementación segura mediante plataforma no tripulada</p> <p>Aplicación</p> <ul style="list-style-type: none"> Independiente de la iluminación. Capacidad para generar modelos batimétricos detallados en zonas someras y profundas (alcance teórico 120 m) Permite fusión con modelos aéreos (fotogramétricos o LiDAR) para generar modelos topobatimétricos integrados 	<p>Condicionantes.</p> <ul style="list-style-type: none"> Sensible a factores ambientales (oleaje y corrientes) Menor precisión por reflexiones multipath en escalones o estructuras complejas. Limitaciones operativas en zonas muy confinadas o con escasa profundidad <p>Coste elevado en adquisición y mantenimiento</p> <p>Requiere integración cuidadosa de sensores (IMU, GNSS y ecosonda). Post procesamiento complejo (corrección de movimiento, calibración y refracción)</p>



Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

España – Portugal



Aeroganp

Universidade de Vigo



AXENCIA
GALEGA DE
INNOVACIÓN



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



CAG
CONSORCIO
AERONÁUTICO
GALLEGO

