

Vehículo aéreo no tripulado para vigilancia y monitorización de incendios

Madridano, Á.*, Campos, S., Al-Kaff, A., García, F., Martín, D., Escalera, A.

Grupo de Sistemas Inteligentes, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España.

To cite this article: Madridano, Á., Campos, S., Al-Kaff, A., García, F., Martín, D., Escalera, A. 2020. Unmanned aerial vehicle for fire surveillance and monitoring. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 17, 254-263. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.11806>

Resumen

Los incendios forestales siguen siendo uno de los grandes problemas ambientales a los que se enfrenta la sociedad en la actualidad. Además del gran impacto medioambiental, la destrucción de ecosistemas y las posibles pérdidas humanas, hay que añadir los costes económicos derivados de la lucha contra el fuego. Todos estos motivos han provocado que se busquen, en la tecnología actual, herramientas y sistemas que permitan ayudar en tareas de la lucha contra incendios y, más en concreto, el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs). El hecho de que los UAVs puedan alcanzar lugares remotos de manera rápida y, embarcar sensores y dispositivos que ayuden en tareas peligrosas y arriesgadas, los hacen idóneos para la lucha contra el fuego. Este trabajo recoge el desarrollo, en colaboración con Telefónica Digital España, de una herramienta eficaz haciendo uso de tecnología actual presente en la robótica, en la cual un dron es capaz de realizar tareas de vigilancia y monitorización de incendios de manera autónoma, gracias a los sensores y dispositivos embarcados en el mismo. Además, se implementa una interfaz gráfica que permita el intercambio de información entre la aeronave y el usuario en tierra.

Palabras clave: UAV, detección, sensores, vehículos autónomos inteligentes, navegación, monitorización.

Unmanned aerial vehicle for fire surveillance and monitoring

Abstract

Forest fires continue to be one of the major environmental problems facing society today. In addition to the high environmental impact, the destruction of ecosystems and possible human losses, the economic costs of fire-fighting must be added. All these reasons have led to the search, in current technology, for tools and systems to help in fire-fighting tasks and, more specifically, the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The fact that UAVs can reach remote locations quickly and embark on sensors and devices to assist in dangerous and risky tasks makes them ideal for firefighting. This work includes the development, in collaboration with Telefónica Digital España, of an effective tool using current technology present in robotics, in which a drone is capable of carrying out fire surveillance and monitoring tasks autonomously, thanks to the sensors and devices on board. In addition, a graphical interface is implemented that allows the exchange of information between the aircraft and the ground user.

Keywords: UAVs, detection, sensors, intelligent autonomous vehicles, navigation, monitoring.

1. Introducción

En los últimos años el campo de los Vehículos Aéreos No Tripulados o Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) ha experimentado un gran auge debido principalmente a los avances en el

campo de la electrónica, los cuales han permitido mejorar ciertas características como el peso, la autonomía o carga útil disponible a precios accesibles.

Los avances tecnológicos en los UAVs han permitido emplear este tipo de vehículos en un gran número de aplicaciones,

*Autor para correspondencia: amadrida@ing.uc3m.es
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

cómo las que recoge Pajares (2015) en su trabajo, que complementen las labores humanas o, en algunos casos, las sustituyan Erdos et al. (2013); Al-Kaff et al. (2017). Además, la posibilidad de transportar cierta carga, han provocado que los UAVs generen soluciones avanzadas que creen un valor añadido. A través del empleo de diferentes sensores embarcados, se pueden realizar estudios y análisis de una amplia gama de entornos, ayudando a reducir costes y riesgos personales, y supervisando zonas de difícil acceso de manera eficaz Toriz et al. (2017); Madridano et al. (2020). Este conjunto de características provoca que uno de los campos donde el uso de UAVs puede generar un alto impacto es en la lucha contra incendios, los cuáles conllevan en la mayoría de lugares del mundo un alto coste económico, social y medioambiental.

En el presente trabajo se presenta el proyecto de investigación, de seis meses de duración, desarrollado en colaboración con las empresas Telefónica Digital España, Dronitec S.L. y Divisek Systems. En el proyecto, se hace uso de las herramientas disponibles en el mercado actual para la creación de un sistema de monitorización de incendios forestales, basado en un UAV equipado con cámaras y sensores térmicos, que junto a otros dispositivos, permite recabar información útil del fuego para los equipos de emergencia desplegados en el entorno. Además, se incluyen los algoritmos implementados para permitir al dron llevar a cabo la misión de manera completamente autónoma, junto con una interfaz gráfica, a modo de estación de tierra, que permita monitorizar el estado del sistema y llevar a cabo acciones de control sobre el mismo. Además, su desarrollo permite a un piloto homologado poder tomar el control en caso de emergencia, lo cual es imprescindible en España debido a la normativa actual.

La estructura del documento es la siguiente. En el apartado 2, se presenta el estado del arte de los UAVs, enfocado al uso de esta tecnología en aplicaciones civiles como agricultura o lucha contra el fuego, junto con algoritmos de percepción presentes en la literatura para detección y monitorización de incendios. A continuación, la sección 3 describe la plataforma experimental diseñada junto con la descripción de los principales elementos de Hardware embarcados en el UAV para el correcto desarrollo de las misiones (Apartado 3.1) y del espacio habilitado para albergar al UAV durante los periodos de carga o StandBy (Apartado 3.2). En el punto 4 se realiza una descripción del software, dividiéndolo en algoritmos encargados de la navegación autónoma del dron (Apartado 4.1) e interfaz gráfica (Apartado 4.2). En el epígrafe 5 se establece un análisis y descripción de las pruebas realizadas en entornos reales, junto a las ventajas e inconvenientes de la tecnología testada. Y, finalmente, el apartado 6 recoge las conclusiones del trabajo, junto con la líneas a seguir en un futuro.

2. Estado del Arte

Los incendios forestales se han convertido en uno de los principales problemas ambientales de la sociedad hoy en día y, en concreto, de países del sur de Europa como España. A parte del impacto y los daños producidos en los ecosistemas destruidos y las posibles pérdidas humanas, es importante considerar los grandes costes directos e indirectos derivados de estos siniestros. Según se recoge en Loureiro and Allo (2018), sólo los

incendios que asolaron Galicia en octubre de 2017 tuvieron un impacto económico de 155,89 millones de euros.

Según fuentes del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España sufre una media anual de 14.476 siniestros que afectan a una superficie de 108.282,39 Hectáreas, con unas pérdidas económicas que superan los 54 millones de euros. Por tanto, se trata de un problema donde los avances tecnológicos en el área de la robótica pueden ayudar tanto en la disminución del número de siniestros como de los costes derivados de las labores de extinción de los incendios ya declarados. En consonancia con esto, nace este proyecto en el que el principal objetivo es conseguir la operatividad de un dron totalmente autónomo que pueda desarrollar tareas de supervisión y monitorización de incendios en entornos rurales.

Durante los últimos años existe una corriente investigadora que busca incorporar los vehículos autónomos, tanto terrestres como aéreos, en el ámbito civil. Si bien, en algunos casos se ha buscado sustituir las funciones de los operadores humanos, en muchas otras se busca emplear esta tecnología como una herramienta que ayude a desempeñar los trabajos de manera más segura y eficiente.

Uno de los sectores con mayor transversalidad hacia la lucha contra incendios es la agricultura. En dicha área se recogen en la literatura una serie de investigaciones cuyos avances tienen interés dentro del ámbito en el que se centra este trabajo. En Albani et al. (2017) se presenta una estrategia para cobertura y mapeado de áreas extensas con un enjambre de UAVs, mostrando una solución eficiente al problema de monitorización y evaluación de grandes áreas de terreno, como es el caso de los incendios rurales. Lottes et al. (2017) presentan algoritmos de visión destinados a la detección y clasificación de cultivos con imágenes captadas con una cámara monocular instalada en un UAV y, aunque no están directamente relacionados con la detección de fuego, presentan una herramienta útil de cara al análisis del entorno rural en el que los vehículos aéreos están trabajando. Otro de los trabajos que recoge métodos de procesamiento de imágenes con aplicabilidad en esta área es el presentado por Ostovar et al. (2016), en el cual, a través del análisis y procesamiento de imágenes captadas por una cámara térmica, se lleva a cabo la detección de personas en zonas forestales, lo cual constituye una herramienta de gran interés de cara al trabajo cooperativo entre vehículos aéreos y personal operativo en tierra.

En Yuan et al. (2016) y Yuan et al. (2017) se detalla el uso de UAVs con sistemas de visión embarcados para poder vigilar y detectar incendios forestales desde Vehículos Aéreos No Tripulados. Aunque los métodos desarrollados basados en visión serían de utilidad en este trabajo, toda su investigación se centra en el desarrollo de los mismos, sin abarcar información acerca de la plataforma empleada ni sobre los métodos de navegación implementados.

En Harikumar et al. (2018) se presenta el uso de un sistema formado por múltiples UAVs, los cuales se usan en una primera fase para la búsqueda y detección de incendios y, en una segunda fase para, en formación, acometer misiones de extinción del fuego. Dicho trabajo, desarrollado en múltiples plataformas, lo que supone un importante avance, presentan similitudes con nuestro trabajo, pero por el momento únicamente recoge resultados en entornos simulados, sin embarcar sus métodos y al-

goritmos en plataformas reales. Centrándose en el desarrollo de un sistema de percepción para la monitorización de incendios dentro de equipos formados por distintos vehículos, Merino et al. (2010) presenta un conjunto de UAVs encargados de tomar imágenes en tiempo real de un incendio forestal, integrando toda la información para poder analizar la evolución del fuego.

Dentro del campo de los sistemas Multi-UAVs, aparece la investigación llevada a cabo por Zharikova and Sherstjuk (2019), en la cual se emplean tres tipos diferentes de vehículos aéreos no tripulados para realizar tareas de patrulla, confirmación y observación del fuego. Su rendimiento ha sido testado en condiciones de laboratorio y muestra que puede ser empleado como ayuda a los equipos en tierra para poder predecir y responder ante una amenaza de incendio. En línea con el uso de sistemas Multi-Robot para labores de prevención y conservación de ecosistemas, se encuentra el trabajo de Couceiro et al. (2019), en el que un equipo formado por vehículos autónomos, tanto terrestres como aéreos, trabajan de manera cooperativa para realizar tareas de mantenimiento en áreas forestales de cara a prevenir posibles daños medioambientales como los incendios.

Trabajos como el desarrollado por Qin et al. (2016) se aproximan más al objeto de este proyecto. En él se recoge el diseño e implementación de un UAV para acometer labores de extinción de incendios de manera autónoma. A diferencia de nuestro trabajo, el dron implementado es un quadricóptero con un ligero depósito, y sus tareas están orientadas a la toma de agua y su vertido sobre el foco del incendio. Aunque a pequeña escala, proyectos como ese muestran que en la actualidad se está trabajando por poder incorporar drones a las labores de extinción.

Por su parte, Imdoukh et al. (2017) desarrolla un UAV con materiales ignífugos que puede realizar misiones de extinción de incendios y de búsqueda de víctimas a través del uso de un extintor embarcado en la aeronave y de cámaras que permiten la visión directa del entorno. En este caso, el UAV es una herramienta para los cuerpos de bomberos, ya que, a través de un operador que maneje el dron, permite conocer datos esenciales del entorno y puede ayudar en las labores de extinción. Aunque los autores indican la posibilidad de emplear este dispositivo en exteriores, lo cierto es que se presenta como una herramienta a utilizar dentro de recintos cerrados.

Por último, relacionado con el uso de UAVs en incendios, surge el trabajo implementado por Chen et al. (2018) en el cual se presenta un algoritmo de optimización de partículas para poder asignar múltiples tareas a los UAVs en entornos dinámicos como son los incendios forestales. La asignación de tareas es junto a la planificación de trayectorias dos aspectos claves en la automatización de la misión, trabajos como el desarrollado por Pajares et al. (2008) muestran algoritmos eficaces como solución a la planificación y toma de decisiones de los UAVs en misiones autónomas. Para ello se realiza un modelado del terreno, y ante la presencia de amenazas emergentes en el entorno, un algoritmo basado en A* es capaz de establecer la trayectoria alternativa para poder continuar hacia la ubicación de destino.

En este apartado se han detallado algunas de las líneas de investigación más recientes en el campo de los drones que incluyen avances tecnológicos en términos de lucha contra el fuego y, que permiten establecer una idea y punto de partida sobre

cuál es el estado actual de la tecnología en este punto y, que justifica el objetivo principal del presente trabajo, orientado al diseño de una herramienta basada en un UAV profesional capaz de realizar labores de vigilancia y monitorización de incendios forestales de manera completamente autónoma.

3. Plataforma Experimental

A la hora de elegir el UAV para el proyecto, se han considerado principalmente aspectos como, poder transportar sensores que permitan la monitorización del fuego, junto a un ordenador embebido de altas prestaciones para el procesamiento de información en el propio dron, la posibilidad de alcanzar áreas dentro del rango de visión de los sistemas de prevención instalados en la zona, la posibilidad de incorporar software libre o el coste. Dada la necesidad de incorporar distintos sensores que permitan acometer las tareas de vigilancia y análisis de los incendios, así como equipos de comunicaciones y procesamiento de datos, se enfoca la elección de la aeronave a drones profesionales, cuyo uso ha sido testado en diversas tareas industriales. Así pues, se ha optado por usar un *Hexacóptero* basado en el chasis s900 de la empresa DJI (Figura 1).

Tanto en la selección del UAV como del resto de componentes descritos a continuación, y debido a la duración del proyecto, se ha optado por escoger dispositivos de software abierto accesibles en el mercado y de los que, o bien se tuviera un conocimiento previo o, bien se tuviera acceso a grandes cantidades de información, acelerando la curva de aprendizaje con dicho dispositivo y, pudiendo de esta manera acortar los tiempos de puesta a punto de la plataforma y, centrando el mayor tiempo posible en pruebas experimentales y desarrollo de software.



Figura 1: Estructura del S-900.

Sobre la estructura del UAV se encuentran instalados 6 motores de 500 W con una hélice bipala de 165 mm, lo que otorga una Masa Máxima al Despegue de 8,2 Kg. Si a esta masa le restamos el peso del propio chasis, el cual se especifica en 3,3 Kg, se posee una carga útil de 4,9 Kg. Dentro de esta carga de útil es necesario incluir el peso de la batería, la cual debe suministrar una energía que permita tanto el vuelo de la aeronave, como la alimentación de los diferentes sensores y equipos. En este proyecto, se ha empleado una batería LiPo de 6 celdas y 12000 mAh, que establece la autonomía del dron en 18 minutos

con todos los sistemas a pleno rendimiento. Si se considera que la velocidad de crucero del dron está limitada por la controladora a 23 Km/h, se establece un valor de autonomía del dron de aproximadamente 7 Km, permitiendo trabajar en áreas locales de 3,5 Km de radio.

En cuanto al control del UAV, es habitual adquirir este tipo de drones con la controladora proporcionada por el fabricante DJI, pero en el caso que concierne al proyecto es necesario trabajar con autopilotos que permitan el desarrollo en software libre, para poder incorporar los algoritmos de navegación y localización desarrollados. La controladora de vuelo elegida ha sido la PixHawk 2 Cube (Figura 2), que dispone de un protocolo de comunicación compatible con el framework Robot Operating System (ROS) sobre el que se desarrollan los algoritmos de generación de ruta y análisis del entorno. Además, posee triple redundancia de sensores (Acelerómetros y Giróscopos) que permiten obtener información más precisa en cuanto a la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales del aparato y, es compatible con sistemas de posicionamiento con correcciones en tiempo real (Real Time Kinematic o RTK) empleado en este proyecto y que, junto a la calibración previa de la estación base, permite obtener precisiones de hasta 20 cm en un radio de 2 Km alrededor de dicha estación.

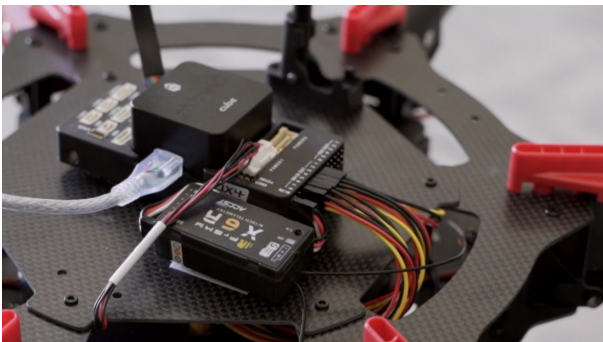


Figura 2: Autopiloto embarcado en el UAV.

3.1. Carga Útil

En este apartado se lleva a cabo una descripción del conjunto de sistemas embarcados en el UAV que permiten acometer de manera satisfactoria las labores de vigilancia y monitorización de incendios en entornos rurales de manera autónoma.

- **Sensores Ópticos:** El UAV lleva embarcado dos tipos diferentes de cámaras que permiten obtener imágenes en tiempo real tanto en el espectro visible como en el infrarrojo. Esto permite recabar información detallada sobre el estado del fuego y el entorno de trabajo. Además, incorpora un estabilizador o Gimbal para conseguir un posicionamiento y orientación correcto de los sistemas de visión, durante la fase de vuelo.

1. **Cámara Monocular RGB:** Cámara monocular de tipo deportiva capaz de adquirir imágenes y vídeos a una resolución de 1920x1080 a 60 fps en HD. Es el dispositivo encargado de suministrar a la estación de tierra imágenes a color sobre la misión que está desempeñando el UAV. Para ello, y, para evitar problemas de ancho de banda, las imágenes captadas

por este sensor son enviadas a 30 fps y con una resolución de 640x480.

2. **Cámara Térmica FLIR AX5 series:** Cámara encargada de recoger imágenes térmicas del incendio (Figura 3), las cuales, tras ser sometidas a algoritmos de procesamiento de imágenes pueden generar información acerca de la temperatura a la cual se encuentran los distintos focos de interés. Su tamaño compacto, la amplia gama de resoluciones y ratios de aspectos y su compatibilidad con diferentes softwares la hacen idónea para trabajar embarcadas en UAVs.

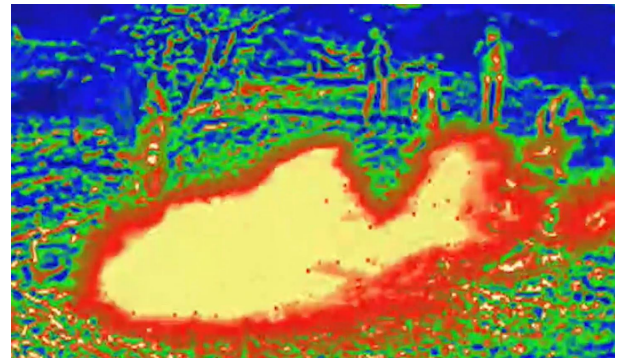


Figura 3: Imagen captada por cámara térmica.

3. **Gimbal:** Aunque este dispositivo no es un sensor óptico, es el encargado de mantener estabilizadas ambas cámaras para poder captar imágenes de interés durante el desarrollo de la misión. Está formado por un conjunto de elementos que permiten su correcto funcionamiento:

- a) **Estructura:** Fabricada en fibra de carbono, es sobre la que se anclan ambas cámaras, los dos motores eléctricos encargados de llevar a cabo los movimientos del estabilizador y los acelerómetros destinados a nutrir a la controladora de la información necesaria para generar las correcciones necesarias.
- b) **Controladora Basecam SimpleBGC:** Su función es generar las señales de control que permitan a los motores mantener las cámaras en una posición óptima para la adquisición de imágenes mientras el UAV navega de manera autónoma. Posee como entrada las señales procedentes de los acelerómetros colocados en el Gimbal, y envía los comandos de control a los dos motores ubicados en la estructura y que se encargan de hacer correcciones tanto en el alabeo (Roll) como en el cabeceo (Pitch). En la guiñada (Yaw) no es necesario hacer correcciones dado que los algoritmos de navegación son los encargados de establecer la orientación correcta del UAV durante la trayectoria.
- c) **Batería Auxiliar:** Por último, es necesario embarcar en el dron una segunda batería LiPo de 3 celdas (11,1 V) encargada de alimentar ambos motores y la controladora.

- **Sensores Digitales de Temperatura DS18B20:** La plataforma empleada va equipada con un conjunto de 5 sensores de temperatura digitales DS18B20, distribuidos a lo largo del chasis del UAV, y que recogen la temperatura ambiente en rangos de -55°C hasta 125°C con una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Para poder procesar la información recogida por estos sensores e integrarla dentro de la arquitectura de software propuesta para la estación de tierra, es necesario instalar en el UAV una placa de Arduino. Este elemento de Hardware es una plataforma de código abierto flexible que permite recoger e interpretar la información captada por los sensores y entregársela al usuario cómo un valor de temperatura para cada sensor instalado. Esta información es útil para, ante todo, evitar que el dron se aproxime de manera considerable al foco del incendio, y permitir al operador en tierra operar sobre la aeronave en caso de que los valores de temperatura de los sensores se encuentren por encima del rango de trabajo especificado por el fabricante.
- **Ordenador de abordó:** En cuanto al sistema de procesamiento es necesario instalar un ordenador con buenas especificaciones, que permitan el procesamiento de toda la información en tiempo real, y cuyo peso y tamaño sean adecuados para poder estar embarcado en un UAV. Por este motivo, el componente elegido es un Intel NUC equipado con un procesado i7 de 7ª Generación, 8 Gb de memoria RAM y un almacenamiento SSD de 240 Gb en una diseño ligero y compacto. El ordenador se encarga de recoger toda la información procedente de los diferentes sensores, procesarla y transmitirla a la estación de tierra. Además, es el encargado de ejecutar los algoritmos de navegación y establecer las comunicaciones con la controladora, lo cual permite, en caso de perder comunicaciones con la estación base, poder completar la misión.
- **Módulo de Comunicaciones:** Por último, es necesario establecer un sistema de comunicaciones que permita el intercambio de datos entre el UAV y los equipos de tierra. Para evitar limitaciones de alcance o interferencias debido a oclusiones, se ha optado por emplear un Módem 3G/4G, para garantizar las comunicaciones en un amplio abanico de situaciones. La conexión implementada está basada en el uso de una red VPN que permite llevar a cabo una configuración específica del sistema de comunicaciones.

Todos lo descrito hasta ahora en este apartado corresponde a los elementos Hardware que hacen posible el desarrollo de las tareas encomendadas. Además, a todo esto, hay que sumar el diseño y desarrollo de un habitáculo en el que se encuentre el dron alojado y resguardado mientras lleva a cabo labores de carga o espera una nueva misión.

3.2. Hangar

La idea del proyecto es poseer un UAV capaz de monitorizar incendios mientras lleva a cabo un vuelo autónomo desde su despegue hasta el aterrizaje, desde el lugar en el que el dron se encuentre protegido de las incidencias climatológicas y dónde puede llevar a cabo labores de recarga de la batería. Por tanto,

es necesario diseñar un espacio caracterizado por: poseer unas dimensiones que permitan el alojamiento seguro del dron; tener capacidad para albergar los sistemas encargados de la recarga de las baterías; estar construido en materiales que aseguren la protección de los sistemas en caso de climatología adversa; y, disponer de mecanismos que faciliten y aumenten la seguridad de las operaciones de despegue y aterrizaje.

Por tanto, teniendo en cuenta las dimensiones máximas del UAV ($1250\text{ mm} \times 1250\text{ mm} \times 730\text{ mm}$) y márgenes de seguridad para operaciones dentro del hangar, se establecen unas dimensiones mínimas de $2000\text{ mm} \times 2000\text{ mm} \times 1500\text{ mm}$. Además, a la hora de diseñar y construir el hangar hay que considerar la opción de instalar ciertos elementos que permitan acometer de manera segura las maniobras de despegue y aterrizaje del dron de manera autónoma. Tras estudiar diferentes propuestas, se ha optado por un diseño que conste de una compuerta superior retráctil partida en dos y una cama desplazable verticalmente que permita llevar a cabo las maniobras de despegue y aterrizaje de manera similar a las realizadas en un recinto abierto, evitando posibles problemas de efecto suelo que afecten a la controladora en maniobras que requieren de tanta precisión (Figura 4).

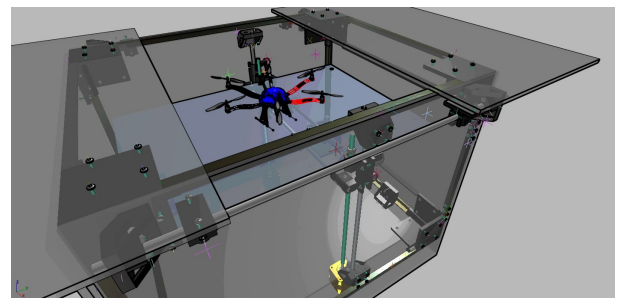


Figura 4: Hangar S-900

En esta sección se han descrito los diferentes elementos de Hardware empleados para la consecución del proyecto. Cómo se puede ver, se han combinado diferentes elementos tecnológicos presentes en el mercado para poder generar una herramienta que permita a los cuerpos de seguridad disponer de la información necesaria para realizar los trabajos de extinción y rescate en incendios de manera más segura.

4. Arquitectura de Software

En esta sección se va a analizar de manera detallada todo el desarrollo de software realizado. Lo primero que se debe remarcar es que todos los algoritmos han sido implementados usando el framework de ROS, lo que permite generar un marco de trabajo que simplifica la generación de Software en sistemas robóticos y la comunicación e intercambio de datos entre varios programas que funcionen de forma simultánea.

ROS presenta un conjunto de herramientas, librerías y convenciones de software abierto que permiten un rápido desarrollo de arquitecturas de control y comunicación en sistemas móviles cómo los UAVs. Dentro de este conjunto de herramientas se encuentra MAVROS, un puente de comunicación entre ROS y MAVLink (Micro Air Vehicle Link).

MavLink es un protocolo empleado para la comunicación con el autopiloto PixHawk, que permite, gracias al uso de MAVROS, acceder a los datos de los sensores instalados en la controladora y también manejar el UAV de forma autónoma a través del ordenador de a bordo.

En este proyecto se han diseñado controladores para cada uno de los sensores, los cuales se encargan de publicar la información en ROS para que cualquier algoritmo de control o la propia interfaz pueda acceder a ella. Las implementaciones principales en materia de software se dividen en los algoritmos necesarios para poder ejecutar la misión de manera completamente autónoma y, el desarrollo de una interfaz gráfica que permita a un operador de tierra supervisar las tareas de manera correcta y poder interactuar con el vehículo.

4.1. Navegación Autónoma

Dentro de los algoritmos desarrollados para hacer posible el vuelo autónomo de la aeronave, durante las labores de monitoreo y supervisión del fuego, es necesario establecer un modo de actuación que se encuentra dividido en varias fases (Figura 5):

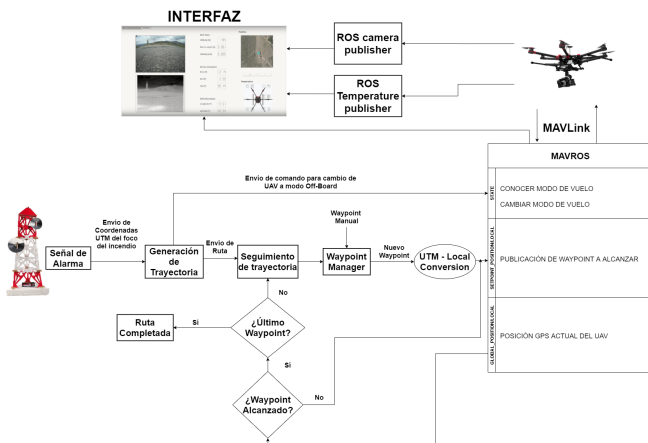


Figura 5: Diagrama de funcionamiento del sistema completo.

1. **Alerta de Incendio:** El UAV, que se encuentra en posición de Standby en el hangar, en modo manual y con sus motores desarmados, recibe una alerta mediante correo electrónico con la posición de un posible foco en coordenadas UTM. Esta alerta es generada por un sistema compuesto por varias cámaras térmicas instaladas en la parte superior de una antena de telefonía. Dichas cámaras se encuentran ubicadas sobre un elemento móvil de velocidad regulable que permite al equipo de visión obtener imágenes en un entorno de 360° en un corto intervalo de tiempo. De esta manera, los sistemas ópticos se encargan de detectar incendios en un radio de 3,5 kilómetros alrededor del equipo de telecomunicaciones, limitados por la autonomía del dron. Tanto la configuración de las cámaras, cómo la recepción de imágenes y la gestión de las alarmas se lleva a cabo desde un centro de control, propiedad de Telefónica, ubicado en las proximidades. Este software es el encargado de establecer la comunicación entre el sistema de alertas y la aeronave y, su implementación se reduce a comprobar una posible alerta e informar en caso de que esta se produzca.

El algoritmo desarrollado está constantemente conectado a un servidor encargado de gestionar las posibles alarmas generadas por el sistema de inspección ubicado en lo alto de la torre. En caso de que se produzca un posible foco o conato de incendios, el servidor recibe una alarma con las coordenadas en UTM del foco declarado, las cuales son empleadas por el dron para poder generar una trayectoria y, poder realizar la captura de imágenes de manera segura.

2. **Generación de Trayectoria:** El algoritmo recibe como entradas, el punto de origen de la ruta (posición del hangar en coordenadas UTM) y las coordenadas UTM generadas en la alerta, y a partir de ambas establece una trayectoria geométrica basada en cálculos matemáticos que permita la monitorización y vigilancia del fuego. Este método genera una lista de waypoints o ruta que el UAV tiene que recorrer para poder completar la misión establecida. Estos puntos de interés poseen tanto la posición local (X, Y, Z) en metros con respecto a la posición inicial (ubicación al despegue) cómo la orientación que debe alcanzar el dron en dicho punto.

Algoritmo 1 Generación de Trayectoria.

Entrada: Posición actual de la aeronave $\{X_o, Y_o, Z_o\}$ y del foco del incendio $\{X_d, Y_d, Z_d\}$ en coordenadas UTM.

Salida: Vector de waypoints que forman la trayectoria.

- 1: Recepción del foco del fuego en UTM.
- 2: Fijación de la altitud parametrizada h para todo el recorrido.
- 3: **imprimir** El punto $\{X_o, Y_o, h\}$ en la trayectoria.
- 4: Fijación del radio r del orbital.
- 5: Calcular la intersección en el plano XY $\{X_i, Y_i\}$ entre la recta recorrida en la fase de aproximación y el orbital de radio r , calculando el punto de inicio de dicho orbital.
- 6: **imprimir** El punto $\{X_i, Y_i, h\}$ en la trayectoria.
- 7: Cálculo de α como ángulo desde el foco del incendio $\{X_d, Y_d, Z_d\}$ hasta el punto calculado en el paso 5.
- 8: Fijación del número de puntos intermedios j que definen la circunferencia.
- 9: **para** $i = 0$ hasta j **hacer**
- 10: **imprimir** El punto $\{X_d + r * \cos(\alpha + (360/j) * i), Y_d + r * \sin(\alpha + (360/j) * i), h\}$ en la trayectoria.
- 11: **fin para**
- 12: **imprimir** Repetir los puntos de forma inversa a partir del paso 6 incluyendo al final el punto de origen $\{X_o, Y_o, Z_o\}$.

La ruta generada incluye el despegue, ascenso, acercamiento al foco del incendio, sobrevuelo alrededor del posible foco y vuelta al punto de aterrizaje siguiendo el mismo camino. Los cálculos matemáticos llevados a cabo en el desarrollo de este método están relacionados con la forma de acometer la misión. Así pues, la fase de acercamiento consiste en una línea recta a altura constante, mientras que el sobrevuelo alrededor del foco se caracteriza por un orbital o circunferencia en sentido antihorario, con el dron orientado siempre hacia el foco del fuego (Figura 6). Por tanto, es necesario llevar a cabo un cálculo de la intersección de dicha recta con la circunferencia que forma el orbital.



Figura 6: Trayectoria Generada

Esta trayectoria está parametrizada de forma que se pueda variar la altitud constante a la que se produce la trayectoria, el número de puntos intermedios y el radio del orbital (Algoritmo 1).

3. **Seguimiento de trayectoria:** Por último, es necesario generar un algoritmo que reciba la lista de Waypoints a visitar y se encargue de verificar que el movimiento del dron es correcto y cumple de manera ordenada los puntos fijados.

Este algoritmo, desarrollado por completo sobre ROS, se establece como un nodo central encargado de ir publicando los puntos de la trayectoria que el dron debe atravesar, a la vez que comprueba la posición GPS actual publicada por MAVROS. De esta manera, se puede comprobar si se ha alcanzado la posición deseada, dentro de un rango preestablecido por el usuario, y pasar al nuevo punto o bien dar por finalizada la trayectoria.

De esta manera, el algoritmo desarrollado se encarga de realizar a través de software cambios en el estado del dron. Así pues, cuando una alerta de incendio es recibida, se realiza un armado de los motores y se cambia el modo de vuelo "Manual" a "Off-Board", momento a partir del cual se comienza con el envío de waypoints y el seguimiento de la trayectoria.

Por tanto, el método implementado envía al autopiloto la siguiente posición a alcanzar, publicando los valores de posición y orientación en el topic habilitado por MAVROS. Como se ha indicado, la ubicación a alcanzar se da en coordenadas locales (distancia en metros desde el punto de inicio), tras convertir las coordenadas UTM generadas anteriormente.

Por último, se comprueba a cada instante si el sistema ha alcanzado la posición deseada. Para ello, se suscribe a la información publicada por el GPS del autopiloto en coordenadas locales. De esta manera, si se encuentra dentro de un rango óptimo parametrizado por el usuario, se da por alcanzado dicho punto y se publica el siguiente, repitiendo este proceso hasta completar la ruta establecida.

4.2. Interfaz Gráfica

La idea de generar una interfaz es poder dotar al proyecto de una herramienta sencilla que permita el intercambio de información entre un operador en tierra y la aeronave y, además, permita a dicho operador poder comprobar que el desarrollo de los trabajos se está realizando de manera satisfactoria. Además, se crea una herramienta visual de alta utilidad para los equipos de emergencia, ya que pueden visualizar en tiempo real el estado del entorno de trabajo y, les permite mejorar la eficiencia y seguridad de las tareas.

La interfaz diseñada está dividida en dos bloques o pestañas. Una primera pestaña usada únicamente para configurar y establecer las comunicaciones entre el ordenador de tierra y el or-

denador de bordo del dron y, una segunda pestaña (Figura 7) que muestra la información captada por los sensores.

Esta segunda pestaña se encuentra dividida en 4 bloques principales, tal y como se ven en la Figura 7.

1. **Sensores Ópticos:** Se establecen dos displays en los que poder ver en tiempo real las imágenes captadas tanto por la cámara RGB como por la cámara térmica. Ambas imágenes se encuentran comprimidas para poder ser transmitidas sin retrasos.
2. **Información del Autopiloto:** Los datos mostrados en esta parte han sido seleccionados en la fase de implementación de la interfaz. Esta área de la interfaz es empleada por operador para conocer datos referentes al estado del dron, los cuales proceden directamente del autopiloto. Entre los datos seleccionados se encuentran: la altitud, la distancia al origen, la velocidad, la orientación del dron o su posición GPS.
3. **Mapa de Posicionamiento:** La idea de este módulo es poder situar al UAV en el mapa a modo de un GPS convencional. A partir de una imagen previamente descargada y geolocalizada del lugar de operación, se puede situar a la aeronave en tiempo real empleando su posición UTM y su orientación o Yaw. Además, como se ve en el recuadro 3 de la Figura 7, se poseen dos botones que permiten hacer zoom en el mapa, de cara a poder escoger una nueva ubicación de interés con precisión, al pulsar sobre el mapa. El motivo de estos botones es debido a que dentro de los algoritmos de navegación se ha implementado la posibilidad de poder añadir un nuevo punto a la ruta generada. De esta manera, cuando el UAV se encuentra siguiendo la ruta preestablecida, el operario puede introducir un nuevo punto de exploración haciendo clic en el mapa. El dron acude a dicho punto, y una vez alcanzado, continua con la ruta prevista.
4. **Sensores de Temperatura:** Por último, el operario cuenta con una ventana en la cual puede conocer la temperatura a la que se encuentra la aeronave, lo cual le permite actuar en caso de que dichos valores suban, indicando que el UAV se encuentra muy próximo al foco del incendio. Además, tal y como se muestra en el recuadro 4 de la Figura 7, los displays de temperatura están distribuidos sobre una imagen de la estructura del UAV, de la misma manera que los sensores han sido instalados en la aeronave, por lo que desde tierra se puede conocer en tiempo real que parte del dron está más próxima al fuego o, en caso de medida errónea o fallo, cual es el dispositivo dañado.

5. Pruebas Experimentales

Para demostrar la validez del trabajo se han llevado a cabo diferentes pruebas en espacio abierto en las que se ha ido probando diferentes aspectos hasta llevar a cabo un test completo de la toda la tecnología desarrollada. En este apartado se presentan y analizan los aspectos más importantes relacionados, principalmente, con la prueba piloto de la herramienta implementada.

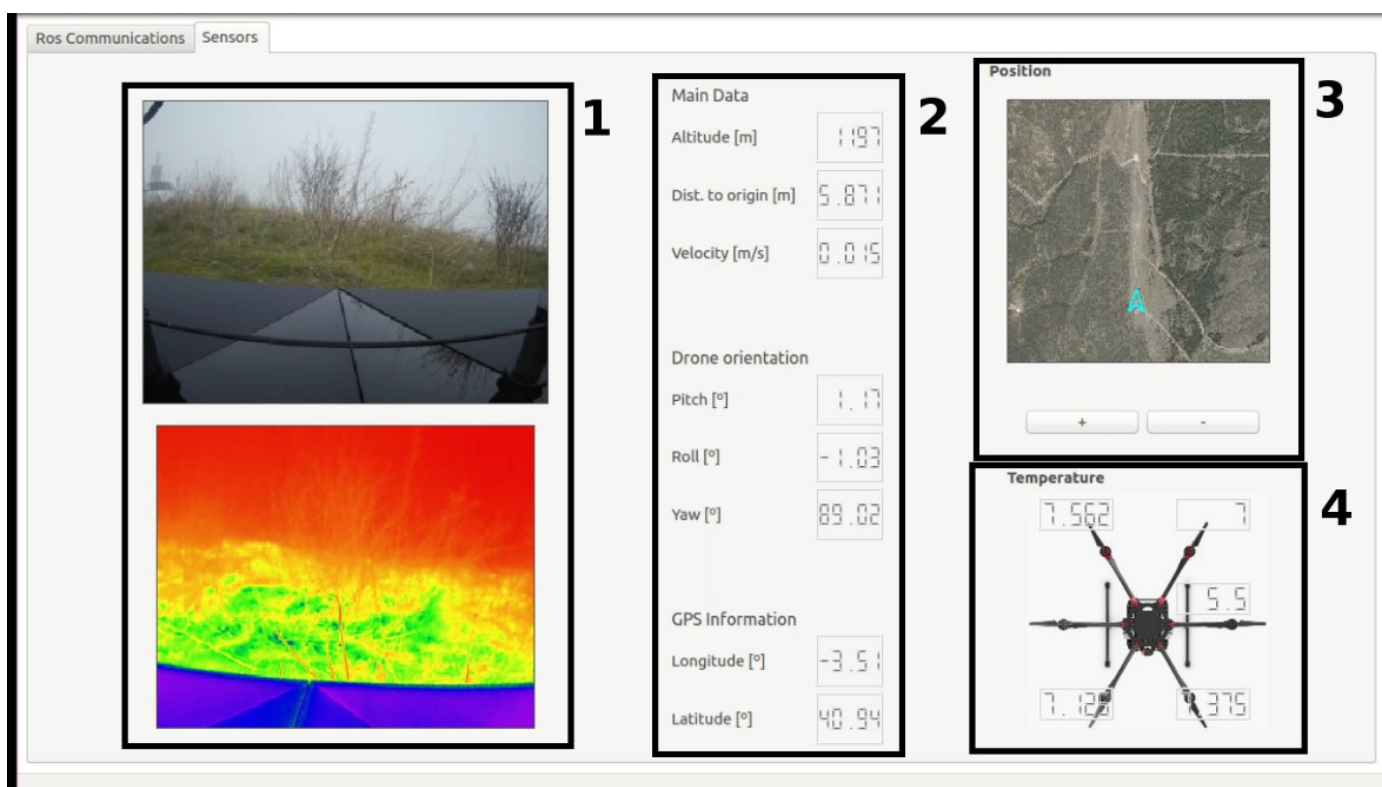


Figura 7: Interfaz

5.1. Escenario

Aunque a lo largo del año de duración se han ido realizando test parciales de los diferentes equipos y algoritmos englobados dentro del proyecto, el objetivo final era realizar una prueba de concepto con fuego real en un paraje forestal ubicado en el Norte de la Comunidad de Madrid. En concreto, el objetivo final es disponer de un vehículo completo en la estación de comunicación que dispone la empresa Telefónica Digital España en la cima de Matachines (Madrid).

Así pues, la prueba completa se llevó a cabo con un incendio provocado y controlado en un área forestal que pudiera ser detectado por el sistema de alerta instalado en una torre de telefonía y, a una distancia aproximada de 600 metros con respecto al punto de despegue del dron. Una vez detectado, el dron, completamente equipado y operativo, fue capaz de completar la trayectoria prefijada mientras realizaba labores de monitorización de manera completamente autónoma.

El área de trabajo se caracteriza por ser un entorno rural con poca vegetación, lo cual ayuda al vuelo seguro de la aeronave al no encontrarse en zona de alta vegetación o árboles que dificultaran el desempeño de la misión, aun así y dado que por la duración y condiciones del proyecto no se incluían algoritmos de navegación destinados a evitar obstáculos, siempre se ha fijado una altura de vuelo (80metros) lo suficientemente alta como para evitar la vegetación, pero que permitiera obtener información útil del entorno.

Aunque la misión descrita a continuación se realizó en condiciones meteorológicas favorables, debido a la ubicación del lugar de operaciones, a lo largo del proyecto se han realizado diferentes test con situaciones climatológicas adversas como el viento, el frío o la niebla. A pesar de que el dron puede volar

en estas condiciones, su utilidad se ve reducida puesto que las cámaras embarcadas no serían capaces de transmitir información útil sobre el incendio.

5.2. Misión y Resultados

Una vez la alerta es declarada, los algoritmos descritos generan una trayectoria que permite al UAV despegar desde una ubicación conocida, acudir al lugar del incendio, realizar un orbital alrededor del foco y regresar al punto de despegue mientras captura datos que son enviados por 4G a la estación de tierra para que el personal allí ubicado pueda conocer cuál es el estado del dron y del incendio a medida que se acomete el trabajo.

La controladora Pixhawk, al igual que el resto de autopilotos comerciales, lleva a cabo grabaciones de los sensores incorporados en la misma lo que permiten, a posterior, analizar información del vuelo y conocer datos de interés del mismo. Así pues, tal y cómo se muestra en la Figura 8 haciendo uso de los datos recogidos por la controladora se puede observar la ruta lleva a cabo por la aeronave durante la prueba de concepto de la plataforma. Esta trayectoria presenta un alto grado de fidelidad con respecto a lo descrito en el algoritmo 1 y lo propuesto en la Figura 6, es decir, el dron realiza una recta durante la fase de aproximación, una vez alcanzada la zona de interés es capaz de realizar un orbital alrededor del foco y, finalmente, volver siguiendo la misma recta descrita durante la fase de aproximación.

A parte de poder comprobar que la ruta sigue fielmente lo programado, los datos recogidos por la controladora, permiten observar que el UAV es capaz de alcanzar de manera precisa los waypoints mandados por el método de seguimiento de trayectoria desarrollado y seguir la orientación fijada durante el orbital

para poder captar imágenes del fuego.



Figura 8: Trayectoria Real

De la información recogida por el autopiloto se extrae que la distancia recorrida durante la prueba fue de 1,34 Km a una altitud de 66 m con respecto al suelo, a una velocidad media de 6,4 Km/h y con unas velocidades máximas de ascenso y desplazamiento de 10,8 Km/h y 22,7 Km/h respectivamente.

En cuanto a la información suministrada por la interfaz, los sensores de temperatura mantienen unos valores constantes (10 °C) a lo largo del vuelo, ya que el radio del orbital (50 m) permite captar información del fuego (Figura 3) sin poner en peligro la integridad de la plataforma.

Las gráficas recogidas en las Figuras 9(a) y 9(b) muestran cómo durante el modo autónomo (Off-Board) el UAV es capaz de alcanzar con la orientación adecuada (línea roja) los puntos mandados a la controladora (línea verde), mientras navega a una velocidad de crucero de 22,7 Km/h. Además, se recogen ampliaciones de dicha gráficas para que se pueda observar con más detalle como el UAV es capaz de seguir la ruta prefijada, con un mínimo error en posición consecuencia del rango de aceptación marcado por el usuario, y parametrizado en el algoritmo, cuya finalidad es permitir un movimiento continuo a lo largo de los waypoints, ya que si la precisión del punto alcanzado se reduce por debajo del metro, sería necesario realizar ajustes finos de PID para que el movimiento global de la plataforma en la misión fuera rápido y preciso. Por tanto, con estas gráficas obtenidas durante una prueba de funcionamiento

en entorno real, se puede establecer que la plataforma es capaz de seguir las trayectorias fijadas para la monitorización de un incendio en un entorno rural de manera autónoma y segura.

6. Conclusiones y Trabajos Futuros

En este trabajo se ha presentado un UAV, propiedad de la empresa Telefónica Digital España, equipado con sensores ópticos y térmicos, y sistemas de comunicación y procesamiento, que le permiten realizar labores de supervisión y adquisición de datos de incendios en entornos rurales. La idea principal es demostrar que con las tecnologías actuales es posible implementar vehículos autónomos que supongan una nueva herramienta de trabajo útil y eficaz para los cuerpos de emergencias.

A parte de detallar todos los componentes de Hardware y sus principales características, en este trabajo se presentan los métodos y algoritmos implementados para que el dron pueda realizar las tareas encomendadas de manera totalmente autónoma.

Por tanto, el presente trabajo recoge el desarrollo realizado a lo largo de seis meses para, en colaboración con Telefónica Digital España, Dronitec S.L y Divisek Systems, poner en marcha una herramienta, basada en un vehículo aéreo no tripulado, capaz de realizar labores de supervisión y monitorización de incendios en áreas forestales transmitiendo información desde el vehículo a una estación de tierra en tiempo real, gracias a enlaces de datos 4G. Además, se muestra como la transferencia de conocimientos en el ámbito universidad-empresa permite la implementación y puesta en marcha de herramientas novedosas que permiten, en casos como este, complementar la labor de los cuerpos de emergencias en tareas de riesgo como es la lucha contra el fuego.

Aunque es cierto que el trabajo ha sido testado en entornos reales y, que los resultados obtenidos son satisfactorios, sería conveniente establecer una serie de puntos a desarrollar en el futuro, los cuales se encuentran fuera del proyecto, que permitan aumentar la robustez, eficiencia y seguridad del UAV a la hora de desempeñar las misiones descritas a lo largo del trabajo.

En primer lugar, sería importante dotar al dron de un carenado, que pudiera mejorar la resistencia de la plataforma tanto a la intemperie, cómo a los agentes meteorológicos o a la suciedad. La instalación de este carenado, unida a la sustitución de elementos como los motores, por unos resistentes al agua, harían que el vehículo se encontrara preparado para volar sin riesgo en condiciones meteorológicas adversas cómo la lluvia o la niebla.

Por último, sería conveniente dotar al dron de sensores y algoritmos que le permitan reconocer y evitar obstáculos presentes en el ambiente, tales como árboles, animales o edificios. Para ello, sería necesario embarcar en el UAV una cámara estéreo o un LIDAR que dotara a la plataforma de la capacidad de distinguir obstáculos presentes en su trayectoria, conocer su ubicación en el espacio y su tamaño, y de algoritmos que le permitan realizar toma de decisiones para poder continuar navegando de forma segura a través de rutas óptimas calculadas previamente.

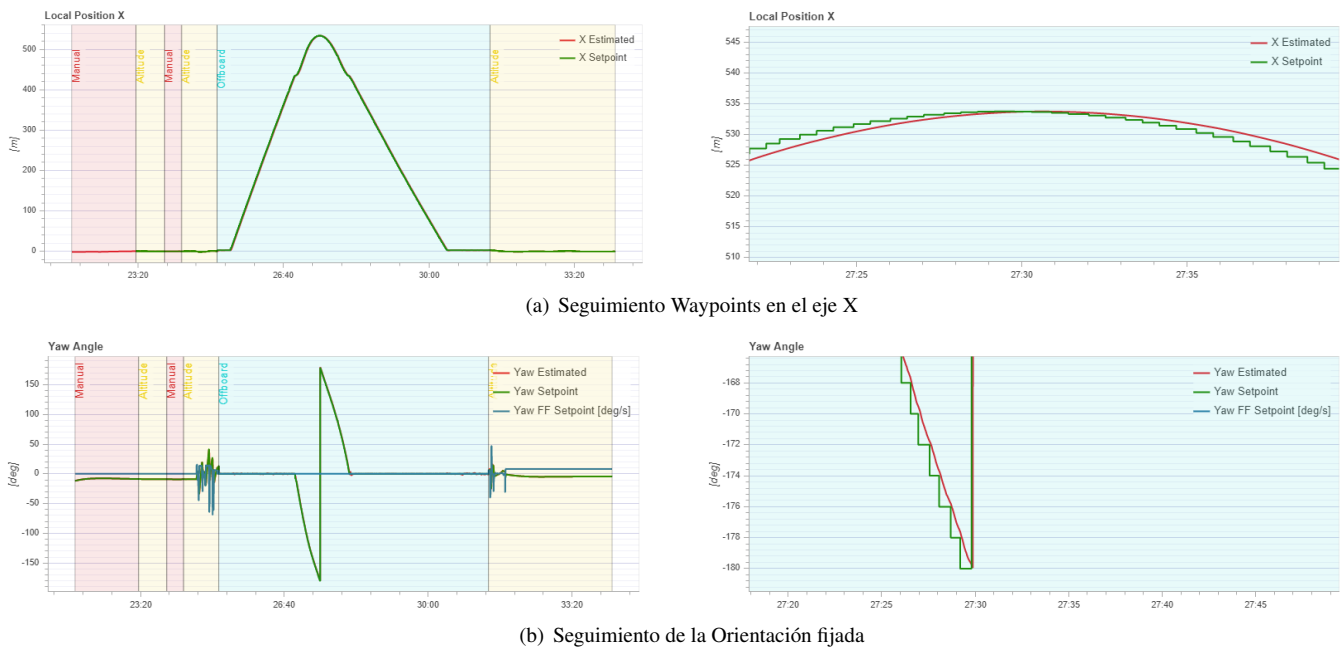


Figura 9: Seguimiento de Trayectoria

Agradecimientos

Este trabajo es financiado por el gobierno de la Comunidad de Madrid a través de la Beca Doctorado Industrial (BECA IND2017/TIC-7834).

El laboratorio de Sistemas Inteligentes agradece TELEFONICA DIGITAL ESPAÑA, S.L.U. su ayuda y financiación a través del proyecto: "Sistemas de UAV Autónomo para Supervisión de Incendios Forestales".

Referencias

- Al-Kaff, A., Moreno, F. M., de la Escalera, A., Armingol, J. M., 2017. Intelligent vehicle for search, rescue and transportation purposes. In: 2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR). IEEE, pp. 110–115.
- Albani, D., Nardi, D., Trianni, V., 2017. Field coverage and weed mapping by uav swarms. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 4319–4325.
- Chen, K., Sun, Q., Zhou, A., Wang, S., 2018. Adaptive multiple task assignments for uavs using discrete particle swarm optimization. In: International Conference on Internet of Vehicles. Springer, pp. 220–229.
- Couceiro, M. S., Portugal, D., Ferreira, J. F., Rocha, R. P., 2019. Semfire: Towards a new generation of forestry maintenance multi-robot systems. In: 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, pp. 270–276.
- Erdos, D., Erdos, A., Watkins, S. E., 2013. An experimental uav system for search and rescue challenge. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 28 (5), 32–37.
- Harikumar, K., Senthilnath, J., Sundaram, S., 2018. Multi-uav oxyrhis marina-inspired search and dynamic formation control for forest firefighting. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.
- Imdoukh, A., Shaker, A., Al-Toukhy, A., Kablaoui, D., El-Abd, M., 2017. Semi-autonomous indoor firefighting uav. In: 2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, pp. 310–315.
- Lottes, P., Khanna, R., Pfeifer, J., Siegwart, R., Stachniss, C., 2017. Uav-based crop and weed classification for smart farming. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 3024–3031.
- Loureiro, M. L., Allo, M., 2018. Los incendios forestales y su impacto económico: Propuesta para una agenda investigadora. Revista Galega de Economía 27 (3), 129–142.
- Madridano, Á., Al-Kaff, A., Martín, D., et al., 2020. 3d trajectory planning method for uavs swarm in building emergencies. Sensors 20 (3), 642.
- Merino, L., Caballero, F., de Dios, J. R. M., Maza, I., Ollero, A., 2010. Automatic forest fire monitoring and measurement using unmanned aerial vehicles. In: Proceedings of the 6th International Congress on Forest Fire Research. Citeseer.
- Ostovar, A., Hellström, T., Ringdahl, O., 2016. Human detection based on infrared images in forestry environments. In: International Conference on Image Analysis and Recognition. Springer, pp. 175–182.
- Pajares, G., 2015. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (uavs). Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 81 (4), 281–330.
- Pajares, G., Ruz, J. J., Lanillos, P., Guijarro, M., de la Cruz, J. M., Santos, M., 2008. Generación de trayectorias y toma de decisiones para uavs. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI 5 (1), 83–92.
- Qin, H., Cui, J. Q., Li, J., Bi, Y., Lan, M., Shan, M., Liu, W., Wang, K., Lin, F., Zhang, Y., et al., 2016. Design and implementation of an unmanned aerial vehicle for autonomous firefighting missions. In: 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). IEEE, pp. 62–67.
- Toriz, A., Raygoza, M., Martínez, D., 2017. Modelo de inclusión tecnológica uav para la prevención de trabajos de alto riesgo, en industrias de la construcción basado en la metodología ivas. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 14 (1), 94–103.
- Yuan, C., Liu, Z., Zhang, Y., 2016. Vision-based forest fire detection in aerial images for firefighting using uavs. In: 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, pp. 1200–1205.
- Yuan, C., Liu, Z., Zhang, Y., 2017. Aerial images-based forest fire detection for firefighting using optical remote sensing techniques and unmanned aerial vehicles. Journal of Intelligent & Robotic Systems 88 (2-4), 635–654.
- Zharikova, M., Sherstjuk, V., 2019. Forest firefighting monitoring system based on uav team and remote sensing. In: Automated Systems in the Aviation and Aerospace Industries. IGI Global, pp. 220–241.