



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FIN DE GRADO

**Programación de rutas para la
navegación aérea de un drone repetidor
de datos como ayuda en la lucha contra
incendios forestales**

Grado en Ingeniería Aeroespacial

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
Universitat Politècnica de València**

Autora: Pilar Albaladejo Meca

Tutor: Miguel Ángel Mateo Pla

Director Experimental: David Vinué Visús

Junio 2020

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se realiza el diseño, la programación y la simulación de la ruta que habría seguido el dron con función de repetidor de datos durante la primera noche del incendio de Cortes de Pallás, está encuadrado dentro del proyecto ETHON. El trabajo se programa en Matlab y la simulación del recorrido del dron se realiza en Google Earth. Se proponen 6 diseños de rutas diferentes y se comparan sus parámetros principales para determinar cuál es la más apropiada para la zona de estudio elegida. La ruta buscada será la que optimice la autonomía del dron y la que permita recoger la máxima información posible. Como ejemplo de aplicación y validación, se usan los datos reales del incendio de Cortes de Pallás, producido en el año 2012. Se pretende estudiar cómo habría afectado la presencia de esta nueva tecnología, qué ruta habría sido más conveniente y, en definitiva, si es o no una solución viable en el control de incendios.

Abstract

In this Final Year Project, the design, programming and simulation of the route that the data repeater drone would have taken during the first night of the Cortes de Pallás fire is accomplished. It is framed within the ETHON project. The programming is developed in Matlab and the simulation of the drone's route is performed in Google Earth. 6 different route designs are proposed and their main parameters are compared to determine which is the most appropriate for the chosen study area. The route sought will be the one that optimizes the autonomy of the drone and the one that allows to collect as much information as possible. As an example of application and validation, the actual data of the Cortes de Pallás fire, produced in 2012, will be used. The aim is to study how the presence of this new technology would have affected, which route would have been the most convenient and, in short, whether or not it is a viable solution in fire control.

Índice

1. Introducción	8
2. Antecedentes	10
2.1. Los incendios forestales en España	10
2.2. El papel de los drones	11
2.3. El proyecto ETHON	13
2.4. Estudio legislativo	17
3. Análisis del problema	21
4. Materiales y métodos	24
4.1. Estudio del incendio	24
4.2. Implementación en Matlab	26
4.2.1. Funciones principales	28
4.2.2. Funciones secundarias	31
4.2.3. Funciones básicas	35
5. Resultados y discusión	36
5.1. Simulación en Google Earth	36
5.2. Análisis de la ruta	40
5.3. Comparativa entre rutas	43
6. Presupuesto	48
6.1. Costes asociados al material	48
6.2. Costes asociados a los recursos humanos	48
6.3. Costes indirectos	49
6.4. Coste total	49
7. Conclusiones y trabajos futuros	50
7.1. Conclusiones	50
7.2. Conclusiones personales	50
7.3. Trabajos futuros	51
A. Apéndice	55
A.1. Ficha técnica VALAQ-360	55

Índice de figuras

1. Evolución conatos-incendios desde 2009 a 2019 [2].	10
2. Riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana [3]	11
3. VALAQ-360 [12]	14
4. Sistema de dispersión de los sensores y acople en la bodega de carga [11]	14
5. Sensores Bseed Drop [14]	15
6. Funcionamiento del proyecto ETHON [14]	15
7. Comparativa entre drones	16
8. Esquema general de la metodología SORA. [18]	19
9. Diseño de la ruta de reconocimiento	22
10. Diseños de ruta de vigilancia	23
11. Área afectada por el incendio [22]	24
12. Avance del incendio en el tiempo [22]	25
13. Evolución del viento por horas [22]	25
14. Zona del incendio a estudiar y ubicación de la base de operaciones	27
15. Líneas de defensa	27
16. Ruta de reconocimiento del dron Repetidor.	36
17. Gráfica de la ruta de reconocimiento del dron Repetidor	36
18. Tramo de la ruta de vigilancia	37
19. Gráfica hasta el minuto 126 de la ruta de vigilancia	37
20. Cambio de línea por fuego	38
21. Operación de cambio de batería	39
22. Gráfica hasta el minuto 370 de la ruta de vigilancia	39
23. Ruta y gráfica final de la ruta del dron Repetidor	40
24. Gráfica de la distancia del dron al sensor a lo largo del tiempo	41
25. Porcentajes de tiempo de vuelo	42
26. Batería de la aeronave a lo largo del tiempo	42
27. Distancia del dron al sensor interrogado a lo largo del tiempo para las rutas 4, 5 y 6	43
28. Distancia del dron al sensor interrogado para las rutas 4, 5 y 6	44
29. Porcentaje de tiempo que los sensores se encuentran dentro del alcance del dron	44
30. Porcentaje de batería consumido en las tres rutas	45
31. Distancia del dron al sensor interrogado a lo largo del tiempo para las rutas 1, 2 y 3	46
32. Distancia del dron al sensor interrogado para las rutas 1, 2 y 3	46

Índice de tablas

1. Categorías de operaciones según el nivel de riesgo [15]	17
2. Costes asociados al material	48
3. Costes asociados a los recursos humanos	48
4. Costes indirectos	49
5. Coste total	49

1. Introducción

En el presente documento se diseña, simula y analiza la ruta de navegación aérea que habría seguido el dron Repetidor durante el incendio de Cortes de Pallás, producido en el año 2012.

Las aeronaves no tripuladas (drones o UAVs) han empezado a utilizarse en diversos ámbitos a lo largo de los años: agricultura, topografía, industria, fotografía, transporte etc. Estas aeronaves presentan serias ventajas con respecto a sus predecesoras: son más económicas, no ponen en riesgo la vida del piloto, son energéticamente más eficientes y pueden realizar maniobras y acceder a zonas que otro tipo de aeronave no sería capaz.

Por todos estos motivos, la aplicación de los UAVs en la ayuda al control de incendios tiene un gran potencial. Los incendios son un gran problema en España, no sólo afectan al Medio Ambiente, también generan contaminación, incrementan los efectos del cambio climático, destruyen ecosistemas, suponen un gran gasto económico y ponen en riesgo vidas humanas. Además, el número de incendios no parece disminuir cada año, y no sólo eso, los incendios producidos son cada vez más devastadores.

Así, para combatir esta amenaza surge el proyecto ETHON. El dron Repetidor forma parte de este proyecto, que, liderado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), busca ayudar a los equipos de emergencias en el monitoreo de los bosques tanto en prevención como en extinción de incendios.

Este trabajo se centra en la ayuda a la extinción de incendios y en particular en el incendio de Cortes de Pallás, que fue especialmente devastador. Se diseña y se simula la ruta del dron Repetidor para este incendio durante una de las noches. Se escoge esta franja horaria porque al caer la noche los equipos de emergencias apenas tienen información del terreno, no conocen el avance del fuego y a la mañana siguiente cuando reanudan su labor, deben estudiar la nueva situación. Gracias al proyecto ETHON, esto cambia, los equipos de emergencias disponen de información en tiempo real enviada por el dron Repetidor durante toda la noche, y así a la mañana siguiente, conocen el estado del incendio, lo que les permite tomar decisiones más acertadas, rápidas y precisas.

De este modo, el objetivo principal de este trabajo es diseñar una ruta de navegación aérea para el dron Repetidor que le hubiese permitido controlar una zona del incendio de Cortes de Pallás. Para llegar a este objetivo se siguen una serie de hitos:

- Establecer el marco jurídico del proyecto ETHON.
- Diseñar diferentes rutas de navegación para el dron Repetidor adaptables a cualquier incendio.
- Comparar sus parámetros principales: duración de la ruta, distancia a los sensores y tiempo de vuelo útil, entre otros.
- Elegir la ruta más adecuada para monitorizar una zona del incendio de Cortes de Pallás.

- Programar dicha ruta en Matlab y visualizarla en Google Earth, incluyendo la simulación del avance del fuego.
- Analizar esta ruta en la situación de fuego real.
- Traducir el código de programación obtenido al lenguaje de la placa de control de la aeronave.
- Realizar pruebas de vuelo.

Así, siguiendo este procedimiento se obtendrá una primera aproximación a la ruta que seguirá el dron Repetidor en una situación real de ayuda al control de cualquier incendio.

2. Antecedentes

En este proyecto se plantean una serie de conceptos teóricos que se deben desarrollar para posteriormente implementar la ruta de navegación.

Se parte del estudio del riesgo de los incendios forestales en España para justificar por qué es necesario desarrollar una tecnología para combatirlos con eficacia. A continuación, se describe el concepto de drone y sus aplicaciones en la extinción de incendios, particularizando en el proyecto ETHON. Por último, se realiza un estudio legislativo de este proyecto.

2.1. Los incendios forestales en España

Los incendios forestales son una gran amenaza ecológica en España. La desertificación, consecuencia de los largos períodos de sequías y olas de calor, intensificados por el cambio climático, hacen que zonas de la península como el Mediterráneo, sean especialmente vulnerables. El paisaje seco resultante de este estrés hídrico lo convierte en el escenario ideal para el desarrollo de un incendio rápido y devastador [1].

Dada la complejidad del fenómeno de los incendios, es fundamental conocer y registrar cuándo y dónde se producen, su extensión, sus causas y la vegetación afectada. Por ello, se realiza un Parte de Incendio Forestal de cada uno de los incendios y conatos, y a partir de ellos se elabora anualmente la Estadística General de Incendios Forestales (EGIF) [2]. Aproximadamente, dos tercios de los siniestros producidos se quedan en conatos, pequeños fuegos incipientes que no afectan a más de 1 hectárea y son extinguidos de forma rápida, sin intervención de terceros. En los últimos años, como se puede apreciar en la figura [1] ha descendido el número de siniestros con respecto a la media.

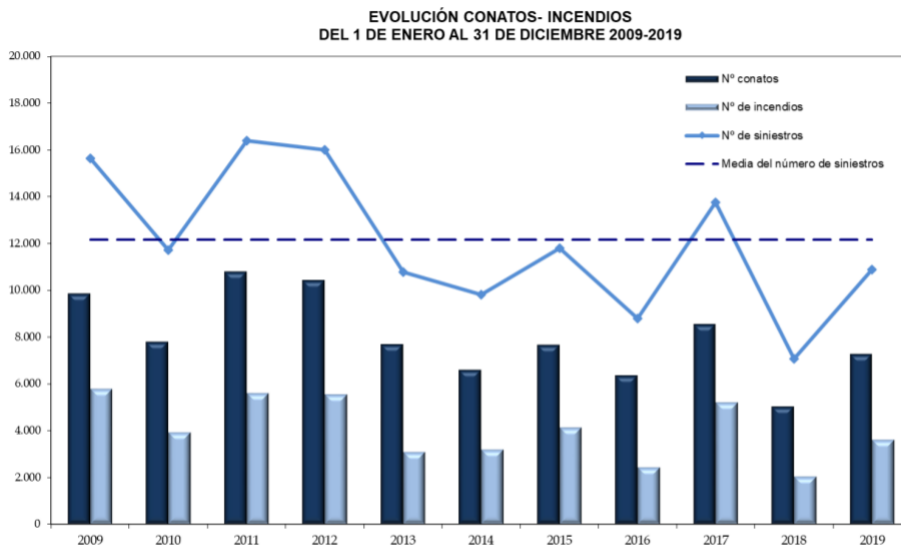


Figura 1: Evolución conatos-incendios desde 2009 a 2019 [2].

Para analizar los incendios, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, divide la península en cuatro zonas:

- Noroeste, incluye Galicia, Asturias, Cantabria, León y Zamora.
- Mediterráneo, incluye a todas las comunidades costeras del mar Mediterráneo.
- Canarias, incluye el archipiélago canario.
- Comunidades interiores, incluye el resto provincias.

Dentro de la zona del Mediterráneo, Valencia presenta un alto riesgo de incendios forestales, como muestra la figura 2. De hecho, dos de los incendios más devastadores de los últimos diez años se produjeron en esta provincia en junio de 2012, y estos fueron el incendio de Andilla y el de Cortes de Pallás. Se catalogaron como Grandes Incendios Forestales (GIF) por extenderse más de 500 hectáreas y suponer un gran riesgo para personas, bienes y ecosistemas 3.

Tradicionalmente, los medios de extinción se han clasificado en terrestres y aéreos. Los medios terrestres se organizan en Brigadas de Refuerzo contra incendios forestales (BRIF) y en los medios aéreos se incluyen a los aviones anfibios y a los helicópteros de transporte de brigadas y bombardeo para la extinción 4.

Gracias al desarrollo de la tecnología estos medios han evolucionado, y la aparición de los drones en el sector facilita su labor, tanto en la extinción como en la prevención de incendios.

2.2. El papel de los drones

Los UAVs o drones, son vehículos aéreos no tripulados, reutilizables, capaces de mantener un vuelo controlado de forma autónoma.

Los primeros drones aparecieron en 1907 creados por los hermanos Jacques y Louis Bréguet, y apenas podían alcanzar una altura de dos pies. Esta tecnología se empezó a desarrollar en 1917 en el ámbito militar, cuando se consiguió el vuelo del Ruston Proctor Aerial Target y durante la Segunda Guerra Mundial, con el FX-1400 (antecesor de los actuales misiles antibuque), y el Radioplane OQ-2, que servía como blanco en el entrenamiento de los pilotos. Tras la Segunda Guerra Mundial, los misiles nucleares se consideraron la invención más prometedora, y este hecho, junto con la aparición de la tecnología de los satélites, puso en pausa el desarrollo de los drones. En 1994 el Predator 5 realizó su primer vuelo, fue el primer drone en utilizar un sistema de posicionamiento global. Después



Figura 2: Riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana 3

de esta aeronave, el sector entró en auge y se desarrollaron drones como el Global Hawk (1998) o el MQ-9 Reaper (2001) [5]. En 2006, la FAA emitió los primeros permisos para utilizar drones en aplicaciones comerciales, atrayendo la atención al sector, que hasta el momento había sido militar, de empresas y profesionales. En la actualidad, el uso de los drones ha aumentado, al igual que sus aplicaciones, se utilizan en: agricultura, ganadería, fotografía, mapeo y topografía, misiones de búsqueda y rescate...

La aplicación que compete a este trabajo es la de ayuda a la extinción de incendios. En este ámbito se han desarrollado distintas soluciones siguiendo dos líneas de actuación:

- Drones para la detección temprana de los incendios y monitoreo. En esta categoría se incluye la aeronave Eagle Vision Voa90 [6] y la UAS AS-III [7], que realizan barridos de las zonas a estudiar proporcionando información en tiempo real y enviando imágenes realizadas con cámaras térmicas. También destaca el proyecto Drones Antiincendios, desarrollado por Telefónica.
- Drones de bombardeo de agua y agentes extintores para combatir el fuego, como los creados por la empresa Nitrofirex [8] y el Drone-Hopper [9], capaz de esparcir hasta 300 litros de agua y de producto retardante.

Telefónica [10] en colaboración con la Universidad Carlos III y las empresas Divisek y Dronitec ha sido una de las primeras compañías en desarrollar una medida para contribuir en la lucha contra los incendios. Su proyecto Drones Antiincendios se centra en la prevención de incendios vigilando áreas extensas con sensores de temperatura y drones. La empresa, utiliza su red de torres de telecomunicaciones que se extiende por todo el país, para ubicar en ellas los sensores de temperatura, que pueden localizar fuegos situados hasta a 15 km de distancia, y los hangares para las aeronaves, cada uno con una capacidad para un drone. Si el sensor detecta un foco caliente, le comunicará las coordenadas a la aeronave, que abandonará el hangar y sobrevolará el punto indicado. Gracias a la tecnología que incorpora la aeronave: 4 sensores de temperatura, una cámara térmica, una cámara normal y controladores de vuelo, ésta es capaz de enviar información sobre la evolución del fuego en tiempo real a los equipos de emergencia, y, además, en particular la cámara térmica le permite realizar incluso vuelos nocturnos. Al finalizar la operación, la aeronave vuelve al hangar donde recarga la batería y queda en espera hasta el próximo incidente.

Este proyecto colabora con los equipos de emergencias de las siguientes formas:

- En prevención, los sensores de temperatura ubicados en las torres vigilan las áreas circundantes y alertan en cuanto se detecta un foco caliente.
- En extinción, la aeronave recopila información que puede ser de utilidad para los equipos de bomberos como: la velocidad del viento, la temperatura e imágenes del incendio en tiempo real.
- Una vez finalizado el incendio, los drones ayudan a la replantación y reforestación dispersando semillas germinadas.

Otro proyecto que se ha destacado es el desarrollado por la empresa Nitrofirex [8]; el concepto que plantea se basa en el uso de un avión lanzador (L.A.), como el IL-76 o el C-17, para transportar a pequeños Depósitos Planeadores Autopropulsados (DPAs)

no tripulados a la zona de fuego, allí, son lanzados desde la rampa trasera de los L.A. y planean descargando el agente extintor. Una vez terminada su tarea, activan el motor que llevan incorporado para regresar a base.

Como se puede apreciar, las funciones de los proyectos son distintas: Drones Antiincendios colabora con los equipos de emergencias antes y durante el incendio proporcionando información, y los drones de empresa Nitrofirex ayudan a extinguir los incendios descargando agua y agentes extintores. Por lo tanto, en una situación real ambos proyectos podrían ser compatibles.

2.3. El proyecto ETHON

La Universidad Politécnica de Valencia (UPV) ha liderado el proyecto ETHON [11] contando con la colaboración de especialistas en extinción de incendios, las empresas UAV Works, encargada del diseño y la fabricación de la aeronave, y Pyro Fire Extinction, desarrolladora de los sensores de temperatura.

Este proyecto surgió por las necesidades expuestas en el Plan Especial frente al riesgo de incendios forestales de la Generalitat Valenciana. Entre ellas se incluyen:

1. El desconocimiento sobre el avance del fuego en zonas de difícil acceso y sobre la situación global del incendio.
2. La ausencia de control nocturno. Cuando los equipos de emergencia se retiran por la noche se pierde información sobre el avance del incendio y a la mañana siguiente se debe estudiar la nueva situación.
3. La necesidad de controlar las zonas con mayor probabilidad de avance del fuego y aquellas que ya han sido afectadas por el incendio, debido a la posible reactivación de los focos. Esta posibilidad se da hasta varias semanas después del fin del incendio, por lo que se necesitaría una vigilancia continua hasta ese momento.

El proyecto ETHON busca cubrir estas necesidades utilizando el sistema ETHON, que consta de una aeronave no tripulada o UAV, una cámara termográfica y sensores de temperatura.

- Aeronave no tripulada. El UAV utilizado corresponde al modelo VALAQ-360 [12] desarrollado por la empresa UAV Works. Se trata de una aeronave convertible cuatrimotor, como se observa en la figura 3, que comparte la eficiencia, el rendimiento y el bajo consumo de los aviones junto con la capacidad VTOL (vertical take-off and landing) de los multicopteros. Además, esta configuración no supone un aumento en el coste, peso o mantenimiento de la aeronave ya que la capacidad VTOL la consigue con una mecánica muy sencilla, sin el uso de rotores o toberas.

La aeronave tiene una autonomía de 3 horas de vuelo, un alcance de hasta 315 km y puede completar misiones de forma autónoma, incluyendo las fases más críticas del vuelo como la transición a modo avión, el despegue y el aterrizaje. Además, tiene capacidad de vuelo nocturno, lo que permite controlar la evolución de los incendios durante la noche.



Figura 3: VALAQ-360 [12]

Su estructura está fabricada con fibra de carbono, consta de 4 motores en disposición trapezoidal y tiene una capacidad de carga de hasta 10 kg, que es más que suficiente para el objetivo que tendrá: el de transportar los sensores a la zona de estudio. UAV Works ha adaptado la bodega de la aeronave para incluir el sistema de dispersión de los sensores, que se muestra en la figura 4, éste se activa por la acción de sus actuadores que están conectados a la placa de control de la aeronave, es decir, cuando se le indica a la aeronave que debe lanzar un sensor, los actuadores activan el sistema de dispersión dejándolo caer.

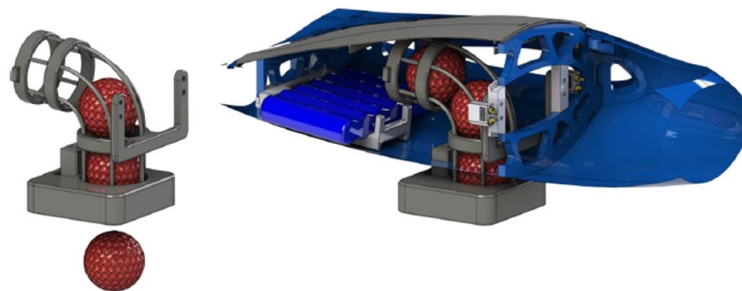


Figura 4: Sistema de dispersión de los sensores y acople en la bodega de carga [11]

El resto de las características de la aeronave están incluidas en el apéndice A.1

- Cámara termográfica. La aeronave incluye la cámara térmica FLIR VUE PRO R 640 [13], que está específicamente diseñada para aplicaciones en drones, y permite recopilar mediciones de temperatura precisas desde el aire almacenando las imágenes píxel a píxel.
- Sensores de temperatura. Los sensores Bseed DROP (figura 5) han sido desarrollados

por la empresa PYRO [14], están formados por una cubierta o contenedor creada con impresión 3D que contiene y protege el hardware. Este hardware incluye un sensor de temperatura, de humedad y un sensor GPS.

El sensor está diseñado para que independientemente del lugar y la forma de su caída, se oriente a sí mismo hacia arriba, quedando paralelo a las curvas de nivel del terreno, de forma que pueda enviar y recibir datos con las menores interferencias.

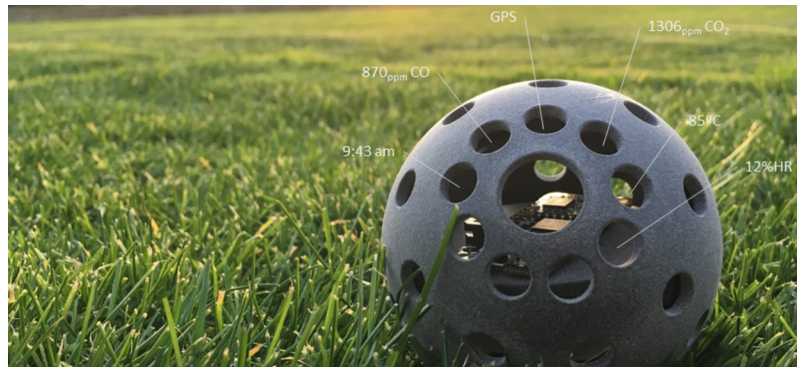


Figura 5: Sensores Bseed Drop [14]

Así, utilizando los subsistemas explicados, la aeronave cumplirá con los siguientes objetivos:

1. Delimitar la región de estudio según las indicaciones de los equipos de emergencias creando líneas de sensores de temperatura.
2. Realizar un seguimiento en tiempo real del avance del fuego comunicando los datos recibidos periódicamente a la estación base.
3. Una vez finalizado el incendio, vigilar la zona afectada para detectar la posible reactivación de focos calientes.

Su uso se limita a la noche, que es cuando más lo requieren los equipos de bomberos. El proceso que sigue para controlar los incendios se describe en la Figura 6.

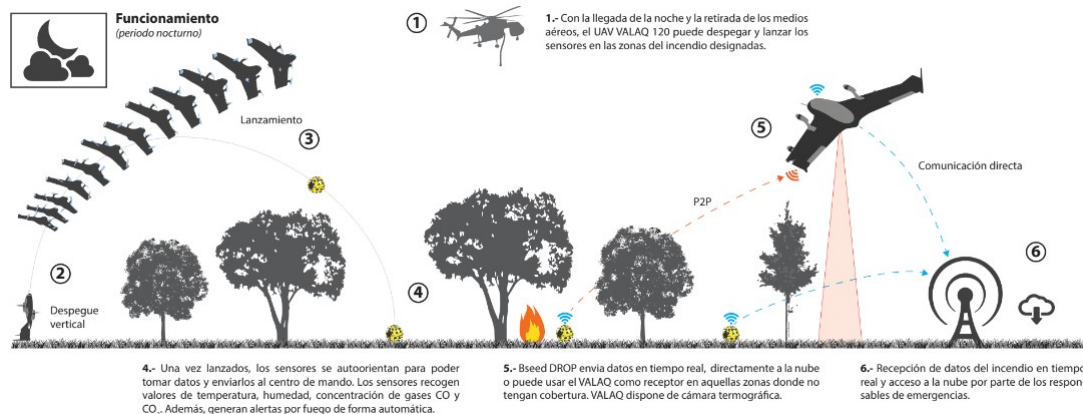
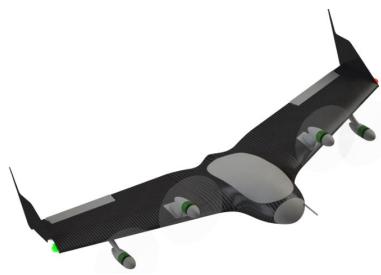


Figura 6: Funcionamiento del proyecto ETHON [14]

En la operación definida, el drone tiene dos funciones: bombardeo y repetidor. La función de bombardeo la realiza cuando transporta los sensores de temperatura a la zona indicada por el jefe de bomberos y activa el mecanismo de dispersión. A partir de este momento, el drone adquiere la función de repetidor, sobrevolará los sensores y enviará la información recibida a la estación base. A partir de este momento, se le llamará drone Bombardero al primero, y drone Repetidor al segundo.

De los proyectos mencionados en el apartado anterior, el que presenta más similitudes con el proyecto ETHON es el desarrollado por Telefónica, ambos tienen como objetivo el apoyo a los equipos de emergencias proporcionando información antes, durante y después del incendio. Sin embargo, en comparación, el proyecto ETHON presenta las siguientes ventajas:

1. Aeronave. En el proyecto de Telefónica se utilizan drones cuadricópteros (figura 7a), con menor autonomía, capacidad de carga útil y eficiencia que el drone VALAQ-360 (figura 7b). Además, su diseño le permite realizar aterrizajes y despegues seguros en terrenos no preparados para ello, los drones cuadricópteros, por el contrario, en caso de emergencia realizarían aterrizajes bruscos con posibilidad de la pérdida de la aeronave.



(a) Drone VALAQ-360 [12]



(b) Drone telefónica [10]

Figura 7: Comparativa entre drones

2. Operación. Mientras que en el proyecto Drones Antiincendios las operaciones se realizan en un radio de 15 km a la torre de comunicación, es decir, son operaciones fijas, el proyecto ETHON puede adaptarse completamente a las necesidades del momento. El jefe de bomberos puede elegir dónde y cuándo dispersar los sensores, el área a estudiar, la separación entre sensores, el tipo de ruta y la ubicación de la base. Además, puede decidir cambiar estos parámetros en cualquier momento de la operación.

En definitiva, una de las características a destacar en el sistema ETHON es su flexibilidad ya que, en un mismo incendio el jefe de bomberos puede decidir estudiar varias zonas de maneras completamente diferentes ahorrando tiempo, recursos y obteniendo la información exacta que necesita.

2.4. Estudio legislativo

Con el desarrollo de la tecnología, el sector de los drones entró en auge debido a sus diversas aplicaciones en todo tipo de actividades profesionales y recreativas. Los drones empezarían a compartir el espacio aéreo con otras aeronaves, y la legislación del momento no contemplaba el nuevo escenario. No sólo debían regularse los distintos tipos de drones según sus características sino también las operaciones que podría realizar cada uno de ellos.

Por ello, el 15 de diciembre de 2017 la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), organismo encargado de la seguridad aérea en España, aprobó el Real Decreto 1036/2017 que sustituía al Real Decreto 552/2014 del 27 de junio, y que entró en vigor en 2018. Solo unos meses más tarde, el 4 de Julio de 2018, la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) estableció un nuevo reglamento (2018/1139) [15] que, en caso de conflicto con los Reales Decretos de los Estados miembros de la Unión Europea, prevalecería sobre estos.

En las regulaciones españolas el criterio para distinguir entre los distintos tipos de operaciones fue, inicialmente, el peso del drone [16], sin embargo, con el nuevo reglamento de EASA se modificó, aceptando como nuevo criterio el nivel de riesgo de la operación. De esta manera, según se muestra en la tabla 1, las operaciones se clasifican en [15]:

	CATEGORIAS		
	ABIERTA	CERRADA	ESPECIFICA
RIESGOS	Bajo	Medio	Alto
RESTRICCIONES	25 kg, VLOS, altura de vuelo inferior a 120 m	Autorización específica basada en un análisis de riesgos (SORA)	Certificación del UAV por EASA, aprobación del operador y piloto licenciado
APLICACIONES	Uso recreativo, público general, fotógrafos	Operaciones BVLOS, transporte de bienes	IFR internacional, entrega de paquetes sobrevolando zonas pobladas, taxi

Tabla 1: Categorías de operaciones según el nivel de riesgo [15]

Además de esta clasificación, a lo largo de los años, han surgido otras atendiendo al tipo de vuelo:

Los *Unmanned Aerial Vehicle* (UAVs) pueden estar pilotados de forma remota, entrando en la categoría de RPAs (*Remotely Piloted Aircraft*), o ser autónomos. Estos últimos no permiten la intervención del piloto durante el vuelo y no están contemplados en el marco jurídico español actual [15].

Por otra parte, según la relación visual que mantienen el piloto y el drone, se distinguen tres tipos de operaciones:

- VLOS (*Visual Line of Sight*). Las operaciones se encuentran dentro del alcance visual del piloto, sin ayuda de dispositivos electrónicos.

- EVLOS (*Extended Visual Line of Sight*). En estas operaciones el piloto no tiene línea visual directa con el dron, sino que es un observador el que se mantiene en contacto por radio, informando de su posición.
- BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*). No hay observador y el dron no está dentro de la visual del piloto. La aeronave deberá contar con sistemas aprobados o autorizados por AESA que permitan detectar y evitar a otros usuarios, y, además, deberá tener instalado un dispositivo de visión.

Atendiendo a estas definiciones, el dron Repetidor pertenece a la categoría de RPA, ya que, aunque regularmente volará de forma autónoma, el piloto siempre podrá tomar el control de los mandos si lo considera necesario. El tipo de vuelo será BVLOS puesto que las distancias a cubrir en las operaciones serán kilométricas, fuera del alcance visual del piloto, aunque éste podrá supervisarlas a través de la cámara que llevará incorporada el dron. Por último, la categoría de operación será específica y será necesario realizar un análisis de riesgos de la operación (SORA) que deberá ser aprobado por AESA.

La metodología SORA, fue desarrollada por JARUS (Joint Authorities for Rulesmaking on Unmanned Systems), organismo que, apoyado por AESA y EUROCONTROL, se encarga de crear material ayudar a la certificación de los UAVs. SORA [17], consiste en una guía que permite evaluar las operaciones con RPAS clasificándolas en uno de los 6 niveles de seguridad e integridad (SAIL) y estableciendo recomendaciones para cada nivel.

Antes de aplicar esta metodología, se deberán considerar:

- Amenazas. Se deberán analizar todas posibles situaciones que pudiesen conllevar lesiones mortales a terceras partes en aire o tierra y daños a infraestructuras críticas.
- Peligros. Se deberán establecer los posibles daños en caso de pérdida de control del dron.

Además, se deberá comprobar que el escenario de la operación no corresponde con ningún escenario estándar definido por AESA.

Los pasos a seguir para aplicar la metodología SORA son los siguientes [17]:

1. Describir el concepto de operación (ConOps). En este apartado se especifican exhaustivamente las características del dron y de la operación.
2. Determinar el Riesgo Intrínseco en Tierra (GRC). Se determina calculando la energía del impacto en función de la energía cinética, da información del riesgo de que el dron impacte contra una persona. En caso de que el dron posea algún sistema que mitigue el impacto, se aplica una reducción en el GRC.
3. Determinar el Riesgo a Aire (ARC). Se trata de una clasificación de la probabilidad de encuentro de la aeronave con otra tripulada en el espacio aéreo considerado, también se estudia el espacio aéreo adyacente.
4. Determinar los objetivos de seguridad operacional. Se establece el SAIL y se identifican los Objetivos de Seguridad Operacional (OSO).

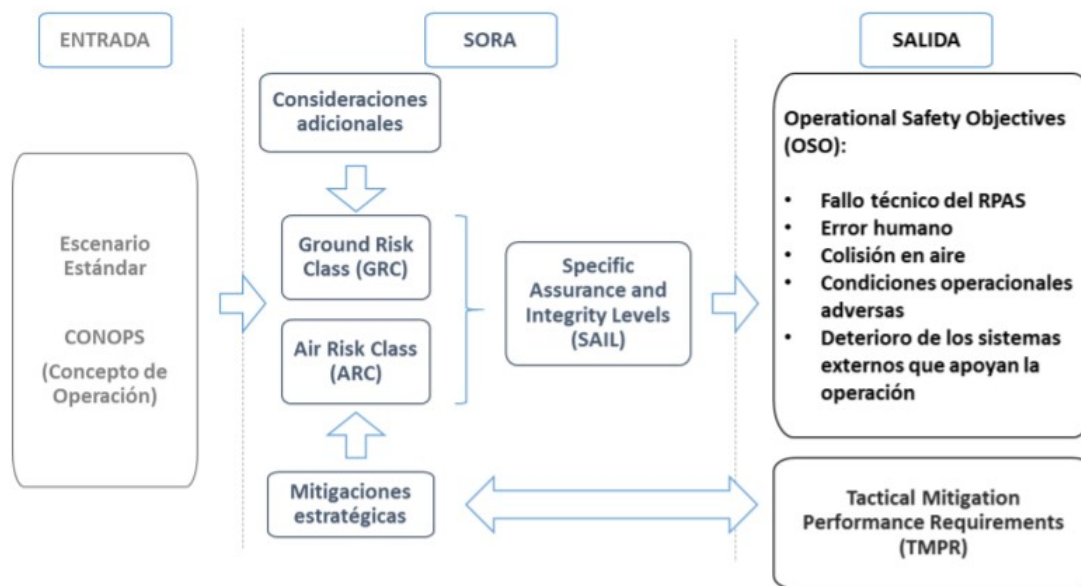


Figura 8: Esquema general de la metodología SORA. [18]

La figura 8 muestra un esquema de los pasos a seguir en el análisis utilizando el método SORA:

Analizando esta metodología, se observa que cada tipo de operación o escenario de vuelo conlleva un análisis distinto. De esta manera, puesto que en el proyecto ETHON, se contemplan varios escenarios: vuelo experimental, prevención y extinción de incendios, se realizará un análisis de cada uno de forma independiente:

■ VUELO EXPERIMENTAL

La Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) clasifica como vuelo experimental a “Vuelos de desarrollo en los que se trate de poner a punto las técnicas y procedimientos para realizar una determinada actividad con aeronaves pilotadas por control remoto (RPA), previos a la puesta en producción de esta actividad, realizados por quien pretenda llevarla a cabo” [19].

Durante el vuelo experimental del dron Repetidor, se comprueba el funcionamiento de la ruta de navegación antes de ponerla en práctica en prevención y extinción de incendios.

En este caso no es necesario realizar un análisis SORA propio, ya que este escenario viene contemplado en la página de AESA [20] como: *ST SX01 Escenario estándar para vuelos experimentales en BVLOS en espacio aéreo segregado para aeronaves de menos de 25 kg.*

Este escenario establece que el vuelo se debe realizar:

- Fuera de aglomeraciones de edificios y fuera de reuniones de personas.
- En horario diurno.
- Fuera de espacio aéreo controlado o zona de información de vuelo (FIZ).
- Fuera de entorno aeroportuario. La operación no requiere aprobación previa

por parte de AESA [20], pero el piloto responsable sí debe estar certificado y, además, la aeronave debe contar con el certificado de aeronavegabilidad en el momento del vuelo, y, en caso de no disponerse, se debe solicitar un “certificado especial para vuelos experimentales”.

■ PREVENCIÓN DE INCENDIOS

En este escenario la aeronave sigue una ruta establecida y constante, en la que sobrevuela sensores previamente ubicados en el terreno y los monitoriza para detectar cambios de temperatura en la zona estudiada.

Al igual que en el caso anterior, este tipo de vuelo es BVLOS, ya que el piloto no tiene visión directa del dron. A pesar de ello, será capaz de seguir su avance a través de una cámara y podrá intervenir en cualquier momento.

Para certificar esta operación es necesario hacer un análisis de riesgos personalizado (SORA), puesto que este procedimiento no está contemplado en los escenarios de AESA. Además, el piloto y la aeronave deben estar certificados y el análisis SORA debe ser aprobado por AESA.

■ EXTINCIÓN DE INCENDIOS

Durante la extinción de un incendio el dron Repetidor trabaja con el grupo de bomberos y las autoridades pertinentes para controlar su evolución. Su misión es monitorizar los sensores de temperatura, principalmente de noche, y, en caso de que el incendio se reactive, volver a la base de operaciones e informar.

Cuando se produce un incendio, el equipo de bomberos toma el control de la situación y cualquier acción que se realice en el perímetro del área afectada deberá ser autorizada previamente. La primera medida que se toma, consiste en formar un Puesto de Mando Avanzado (PMA) desde el que se dirigirán las operaciones de las Unidades Básicas. La dirección del PMA será responsabilidad del Capataz Coordinador Forestal, Coordinador Forestal o Sargento disponible y sus funciones principales serán las descritas en el *Plan Especial de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana* revisado el 01/12/2019 [21].

Dicho Plan Especial establece que: “*En un primer momento y hasta la constitución de las Unidades Básicas, todos los medios humanos y materiales en el terreno estarán bajo el mando directo del Director del PMA. En el momento en que se constituyen las Unidades Básicas, dichos medios pasarán a formar parte de sus Unidades Básicas respectivas*” [21].

Por lo tanto, a la hora de sobrevolar un incendio, el dron, se encuentra bajo la supervisión directa del Director del PMA y tanto las restricciones de altura y operatividad como los puntos de paso, están establecidos por el mismo. Una vez formadas las Unidades Básicas descritas en el mismo Plan Especial, pasa a estar bajo el mando del encargado de Coordinación de la Unidad Básica de Intervención, aunque siempre, en última instancia, recibe las órdenes del Director del PMA.

Además de seguir las órdenes establecidas por las autoridades, el tipo de operación y el análisis de riesgos (SORA) debe haber sido aprobada por AESA, y la aeronave y el piloto deberán estar certificados para el vuelo.

3. Análisis del problema

Como se ha explicado en la sección anterior, el sistema ETHON puede realizar labores de prevención, extinción y control de reactivación de focos calientes después de los incendios.

Este proyecto se centra en la ayuda a la extinción de incendios durante la noche, momento especialmente crítico para los equipos de emergencias por la falta de visibilidad. El sistema ETHON permite que los equipos de bomberos permanezcan en la base de operaciones, sin arriesgar sus vidas, mientras la aeronave controla el avance del fuego y les envía información.

El control del avance fuego se realiza con dos drones:

- Bombardero. Dispersa los sensores por el terreno siguiendo las indicaciones del jefe de bomberos.
- Repetidor. Realiza barridos sobrevolando y recopilando información de los sensores, que periódicamente envía a la estación base.

El modelo de estos drones es el mismo (figura 3), con la diferencia de que el dron Bombardero contiene la bodega de carga y el sistema de dispersión de sensores (figura 4).

Para explicar el proceso que se sigue, primero se deben establecer las condiciones de la operación:

- Velocidad de la aeronave. Se elige una velocidad constante e igual a 50 km/h.
- Viento. La aeronave puede soportar ráfagas de hasta 30 km/h; de alcanzar velocidades superiores no sería capaz de mantener un vuelo estable y acabaría perdiendo el control e impactando contra algún obstáculo.
- Batería. Tiene una duración de 3 horas, y por motivos de seguridad, cuando alcanza el 20% de su carga total la aeronave debe haber vuelto a base.
- Líneas de defensa o de estudio, y separación entre sensores. El Jefe de Bomberos define estos parámetros según las condiciones el terreno y del incendio.

La operación se inicia cuando el Jefe de bomberos lo autoriza y la velocidad del viento es inferior a 30 km/h, en este momento, el dron Bombardero abandona la base y dispersa los sensores por las líneas indicadas.

A continuación, y siempre con el permiso del jefe de bomberos, el dron Repetidor inicia su recorrido, que se divide en dos fases:

- Ruta de reconocimiento. En esta ruta, el dron Repetidor recorre las líneas y recibe las coordenadas reales de los sensores. En una situación ideal, las coordenadas de los puntos de las líneas de defensa definidas por el Jefe de bomberos y las coordenadas de los sensores serían las mismas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que cuando el dron Bombardero dispersa los sensores vuela a 50 km/h, hay viento y, además, el terreno puede ser irregular.
- Ruta de vigilancia. El dron repetidor interroga a los sensores, que le devuelven valores de temperatura. La aeronave, envía la información periódicamente a base y da la alarma si alguno de los sensores ha detectado fuego.

En resumen, los pasos que se siguen para realizar la operación de ayuda en la extinción de incendios son:

1. El jefe de bomberos estudia el estado del incendio durante el día eligiendo las zonas de mayor probabilidad de expansión.
2. Dentro de cada una de estas zonas, define varias líneas de defensa para controlar el avance del fuego.
3. A la hora establecida por el jefe de Bomberos, el drone Bombardero dispersa los sensores por las líneas indicadas.
4. Cuando el Jefe de Bomberos da la orden, el drone Repetidor realiza una ruta de reconocimiento para comprobar las coordenadas reales de los sensores.
5. A partir de estas coordenadas, el drone Repetidor realiza una ruta de vigilancia el resto de la noche, interrogando a cada uno de los sensores, y en caso de fuego avisando a base.

En este proyecto, se realiza el diseño, la programación y simulación de las rutas que sigue el drone Repetidor, se parte de que el drone Bombardero ya ha situado los sensores en el terreno.

Cada fase del recorrido que realiza el drone Repetidor requiere un diseño diferente, ya que los objetivos de cada ruta son distintos:

- Ruta de reconocimiento. El objetivo de esta ruta es obtener las coordenadas de los sensores, por lo tanto, se escoge un diseño que permite que la aeronave sobrevuele directamente los sensores, como se puede observar en la Figura 9. Las líneas de defensa se muestran en rojo y la ruta de reconocimiento en azul.



Figura 9: Diseño de la ruta de reconocimiento

- Ruta de vigilancia. Cuando el drone recorre esta ruta, debe recopilar la máxima información posible a la vez que optimiza su autonomía. En este caso se han propuesto varios diseños, que se muestran en la figura 10.

El procedimiento para el estudio de los sensores es diferente. En las rutas 1, 2 y 3, la aeronave vigila los sensores línea por línea, únicamente pasa a la línea siguiente cuando

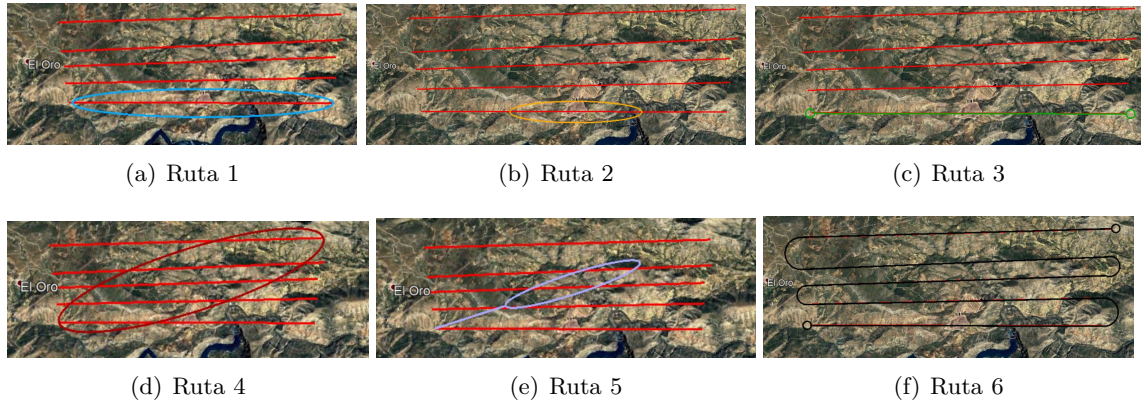


Figura 10: Diseños de ruta de vigilancia

un sensor de la línea actual detecta fuego. En las rutas, 4, 5 y 6, el drone controla a todos los sensores en el primer barrido que realiza.

En cuanto a su forma, las rutas son equivalentes:

- La ruta 1 y la ruta 4 son elipses. En el primer caso, su eje mayor es la longitud de la línea de defensa, y en el segundo, es la línea que une el punto inicial y el final de la ruta.

- Las rutas 2 y 5, también son elipses, aunque en estos casos los ejes mayores comienzan a una distancia de 2 km y finalizan 2 km antes. Se elige el valor de 2 km por ser el alcance máximo de los sensores.

- En las rutas 3 y 6, la aeronave recorre las líneas sobrevolando directamente los sensores, realiza un giro de 360° para cambiar de sentido al llegar al final del recorrido. Como la aeronave no puede girar sobre sí misma, debe realizar un círculo, se elige el mínimo radio de giro posible (100 m) para ahorrar tiempo.

El estudio analítico de estas rutas se realiza en el Apartado [5](#).

4. Materiales y métodos

En la sección anterior se ha definido un sistema para el diseño de rutas del drone Repetidor. Sin embargo, no es posible afirmar que sólo una de esas rutas sea la solución a cualquier incendio que se produzca, ya que cada una dispone de una serie de características que varían su efectividad según la situación en la que se aplican. Por ello, y como ejemplo de solución, se realiza el estudio de una zona de un incendio concreto y se selecciona la ruta 1 (la figura 10 a), que como se explicará en el apartado 5 es la más adecuada en este caso.

4.1. Estudio del incendio

El incendio elegido para simular la ruta de navegación del drone Repetidor es el incendio que se inició el 28 de junio de 2012 en el término municipal de Cortes de Pallás, provincia de Valencia. La Figura 11 muestra la información geográfica del incendio, que se inició a las 16:00 del día 28 en un punto cercano a Cortes de Pallás (marcado con una estrella en la figura) y se extendió hasta abarcar una superficie de 29.752,02 hectáreas (zona dentro de las líneas rojas de dicha figura). Tardó 7 días en extinguirse por completo y supuso un gran reto para los equipos de bomberos, que trabajaron en un terreno irregular caracterizado por profundas pendientes y barrancos (en la misma Figura 11 se puede apreciar la orografía irregular del terreno) [22].

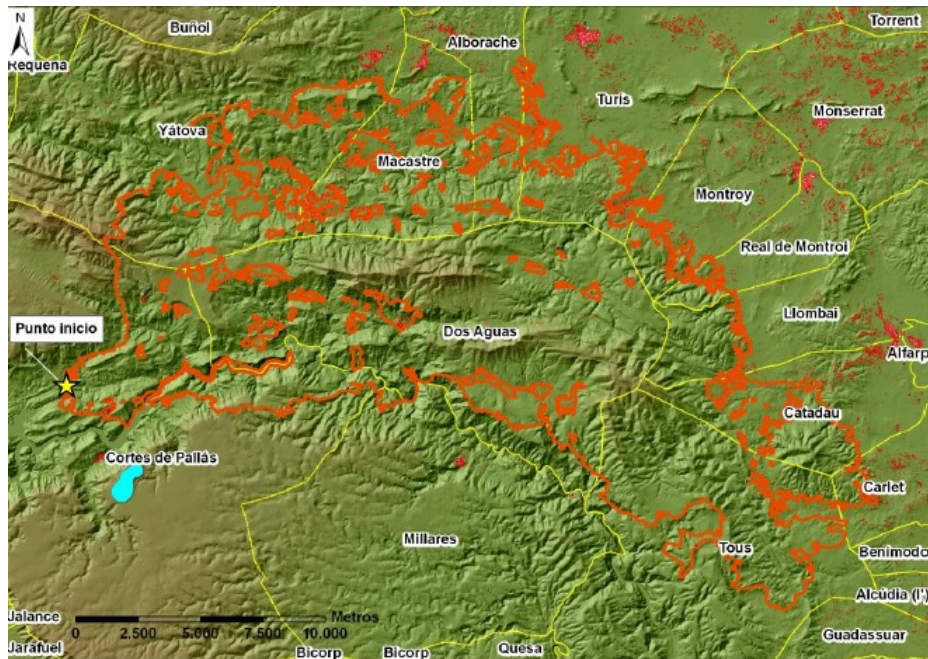


Figura 11: Área afectada por el incendio [22]

La Figura 12 muestra el avance del incendio a lo largo de los días. Se diferencian los días por colores, y en cada uno de los días se distinguen diferentes zonas, según la dirección de avance del fuego, por tonalidades.

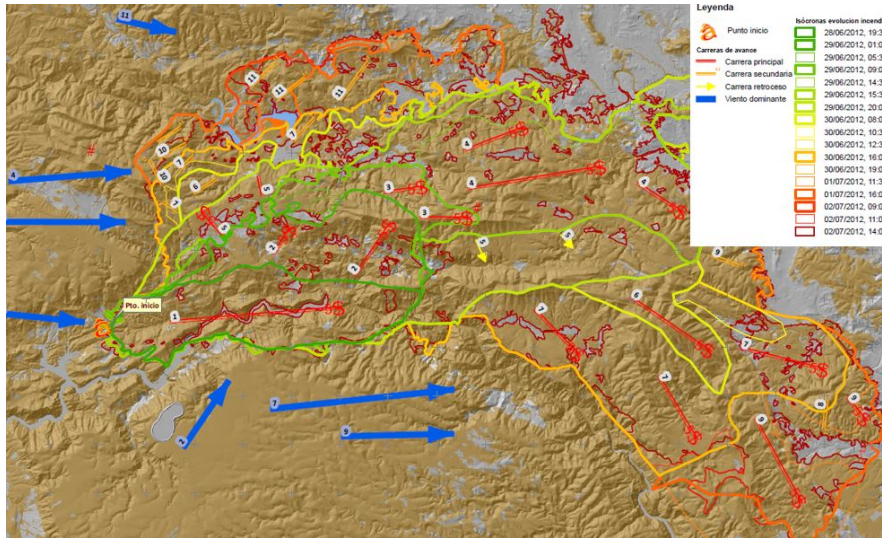


Figura 12: Avance del incendio en el tiempo [22]

Las condiciones adversas del incendio (la temperatura elevada, las fuertes ráfagas de viento y la vegetación seca) provocaron que se extendiese por el cañón del río Xúquer, recorriendo 13 km en apenas 2,5 horas. Pasadas las 3,5 horas de su inicio ya afectaba a una superficie de 3.000 hectáreas, y después de las primeras 24 horas alcanzó un total de 12.500 hectáreas. Siguiendo esta tendencia, el incendio se fue extendiendo de manera constante por todo el territorio [22].

La figura [13] describe la velocidad y la dirección del viento durante los días que dura el incendio. Se observa que las ráfagas de viento alcanzan mayores velocidades durante las horas del día, mientras que al caer la noche no suelen superar los 30 km/h. En cuanto a la dirección del viento, aunque predominó el viento de poniente, fue bastante irregular, lo que provocó que se generasen carreras tanto en la zona Este como en la Oeste.

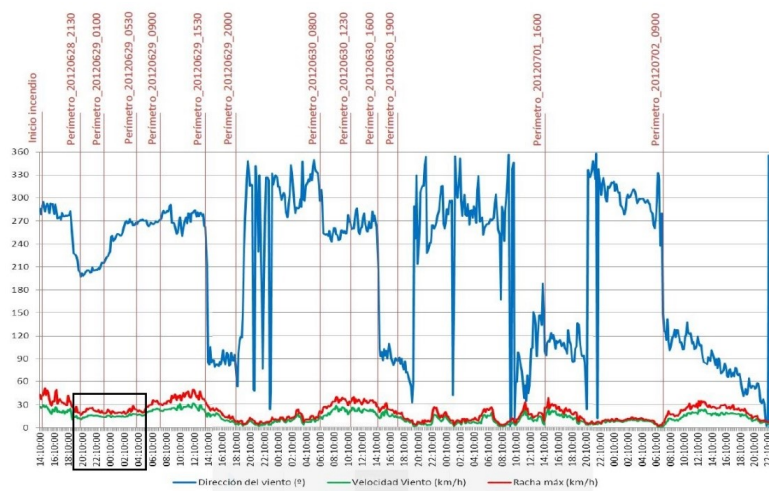


Figura 13: Evolución del viento por horas [22]

- Área de estudio.

Dada la extensión del incendio y su larga duración, sólo se va a realizar el estudio de una zona concreta. Esta área está delimitada por las isócronas verdes (figura 12) y corresponde a la franja horaria entre las 19:30 de la tarde del día 28 de junio y las 5:30 de la mañana del día siguiente. Como se puede observar, la cuadrícula negra de la Figura 13 señala esta franja horaria. En ella la velocidad del viento no supera los 30 km/h, condición esencial para el vuelo de la aeronave. No se podría iniciar la ruta antes de las 19:00, ya que la velocidad del viento es mayor y se pondría en riesgo la seguridad de la aeronave. Por otra parte, esta gráfica también limita la hora de vuelta del dron Repetidor, que, por el mismo motivo, independientemente de que haya fuego o no, deberá volver a la estación base a las 5:30 de la mañana.

Así, el dron Bombardero iniciará su recorrido a las 19:00 aproximadamente, y, a continuación, le seguirá el dron Repetidor, realizando primero la ruta de reconocimiento y posteriormente, la de vigilancia.

4.2. Implementación en Matlab

La ruta de navegación que realiza el dron Repetidor se ha programado en Matlab y se ha simulado en Google Earth.

Matlab (MATrix LABoratory) 23 es un sistema de cómputo que permite tanto realizar cálculos numéricos operando con matrices y vectores como analizar y modelar sistemas. Ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) y presenta su propio lenguaje de programación. Además de sus funcionalidades básicas, se han desarrollado numerosas *toolboxes* para las distintas aplicaciones. En este caso se utiliza la *Toolbox "Mapping"* modificada para representar los vectores de posición que componen la ruta aérea y operar con ellos.

Google Earth 24 es un programa informático que utiliza las imágenes satelitales y fotografías aéreas para crear una Tierra digital. La precisión de este programa no es muy elevada, pero para el propósito de visualizar rutas de vuelo kilométricas es suficiente.

Para implementar la ruta de vuelo se han seguido los pasos indicados en el apartado 3 (Análisis del problema) de este proyecto:

1. Elección de la zona del incendio. A partir de los datos obtenidos en el informe del incendio de Cortes de Pallás, se selecciona la zona a estudiar en Google Earth que corresponde a la primera noche del incendio (isócronas verdes en la Figura 12).

Se sitúa la base de operaciones en Los Herreros, como se puede observar en la Figura 14. Se considera que esta base es adecuada al encontrarse en una zona poblada, conectada por carreteras y a alejada del incendio (7 km). Cualquier localización que cumpliera con estas características podría ser aceptable, de hecho, en una situación real la ubicación de la base no sería fija, se iría modificando según el avance del incendio, ya sea para acercarla a la zona de estudio o para alejarla en caso de peligro.



Figura 14: Zona del incendio a estudiar y ubicación de la base de operaciones

2. Definición de las líneas de defensa. Se simula la orden del jefe de bomberos eligiendo 5 líneas de estudio, que como se muestra en la Figura 15, se han trazado en Google Earth. Están separadas 500 m y cada una tiene una longitud de aproximadamente 7 km. El archivo *kml* resultante contiene las coordenadas en LLA de los puntos por los que están formadas estas líneas, más adelante, se leerá en Matlab y se utilizará para realizar la ruta.



Figura 15: Líneas de defensa

3. Ruta del dron Bombardero. En esta simulación, se parte de que el dron Bombardero ya ha realizado su ruta, es decir, ya ha dispersado los sensores en las líneas de defensa y ha regresado a base. Se establece que la separación entre sensores es de 100 m.
4. Ruta de reconocimiento. Corresponde a la figura 9.

5. Ruta de vigilancia. Se trata de una ruta iterativa en la que el dron Repetidor controla el avance del fuego por las líneas a partir de la información que recibe de los sensores de temperatura. Puesto que se ha elegido la ruta 1 (figura 10a), la aeronave comienza en la primera línea, y cuando uno de los sensores da la alarma de fuego, se desplaza a la siguiente. Solo vuelve a base cuando su batería es demasiado baja o cuando aparece fuego en la última línea.

Una vez explicado el proceso, se describe el código programado en Matlab de las rutas. El archivo principal de este programa realiza llamadas al resto de funciones, como muestra el pseudocódigo siguiente:

INICIO

Lee las coordenadas introducidas en Google Earth

Llama a la función `ruta_de_reconocimiento`

Llama a la función `ruta_de_vigilancia`

FIN

Pseudocódigo del archivo principal

Para distinguirlas, las funciones de este código se han clasificado en: principales, secundarias y básicas.

4.2.1. Funciones principales

Las funciones principales componen el esqueleto del programa, son las que proporcionan información de las coordenadas que seguirá la aeronave, primero, en la ruta de reconocimiento, y después en la de vigilancia.

1. *Ruta_de_reconocimiento.m*.

El archivo *ruta_de_reconocimiento.m* es una función cuyas entradas son las coordenadas de las líneas definidas por el bombero (figura 15) y las coordenadas de la base situada en Los Herreros. A partir de estas coordenadas, el *script* calcula los *waypoints* que seguirá el dron para realizar la ruta de reconocimiento.

En primer lugar, se leen los datos de las líneas de fuego, que están almacenados en la estructura *plan1*.

El programa tiene en cuenta que el orden de introducción de los datos por parte del bombero es desconocido, por ejemplo, podría trazar las líneas en Google Earth de izquierda a derecha, de derecha a izquierda y cada línea de forma diferente. Por ello, primero ordena las coordenadas, llamando a la función *reordena.m*.

A continuación, calcula las coordenadas en las que deberían estar los sensores lanzados por el dron Bombardero. Conociendo la separación entre sensores y la longitud de las líneas, se calcula el número de sensores necesarios para cubrir la zona y las coordenadas de cada uno. En este punto el programa ya tiene las coordenadas ideales de los sensores.

Además de estas coordenadas, necesita una función para realizar los arcos de conexión entre las líneas, la función *arcos.m*.

Una vez definidas todas las coordenadas, el dron inicia la simulación de la ruta de reconocimiento, interrogando a cada sensor conforme lo sobrevuela y recibiendo sus coordenadas reales, que almacena en el vector *wpreconocimientoreal*.

Completada la ruta, las coordenadas teóricas y las reales se guardan en el documento Excel *ruta_de_reconocimiento.xls*. La desviación entre estas coordenadas podría dar información acerca de la irregularidad del terreno y de la dirección del viento. En esta simulación este parámetro, que es diferente para cada sensor, se ha establecido manualmente a partir de una distribución binomial de media cero y desviación típica de 1 m. Aunque en este proyecto no se podrían realizar estudios estadísticos ni extraer conclusiones a partir de este documento, en una situación de fuego real, podría servir para decidir cambiar el tipo de ruta o la cantidad de sensores a lanzar.

Finalmente, la aeronave realiza un arco de vuelta a la primera línea, llamando a la función *arco_vuelta.m*.

Los parámetros de salida de la función *ruta_de_reconocimiento.m* son las coordenadas reales de los sensores, el número de sensores por línea y la distancia total recorrida.

INICIO

Lee las coordenadas de los puntos de las líneas de vigilancia

Ordena los puntos

Calcula el número de sensores

Desde el primer sensor hasta el último

 Calcula las coordenadas ideales del sensor

 Crea el waypoint

Si hay cambio de línea

 Crea el arco de cambio de línea

Fin de si

 Sobrevuela el sensor

 Recibe las coordenadas reales del sensor

Fin de desde

Define las nuevas coordenadas de los sensores

Almacena las nuevas coordenadas en una tabla Excel

Realiza un arco de vuelta a la primera línea

FIN

Pseudocódigo de la función ruta_de_reconocimiento

Como se puede observar en el pseudocódigo, en esta ruta, no se incluye como condición de vuelta a base la duración de la batería de la aeronave, ya que no parece razonable realizar una ruta de reconocimiento cuya duración supere a la de la batería.

2. *Ruta_de_vigilancia.m*

El archivo *ruta_de_vigilancia.m* es una función cuyas entradas son:

- Las coordenadas de la base.
- Las salidas de la función *ruta_de_reconocimiento*, es decir, las coordenadas reales de los sensores, almacenadas en el vector *wpreconocimientoreal*, el número de sensores por línea y la distancia total recorrida.

Las variables principales de esta función se definen como: *elipse*, *batería*, *alarma*, *ultimowp* y *stotal*.

- *Elipse*. La variable *elipse* indica la línea en la que se encuentra la aeronave, se inicializa en 1, puesto que se empieza sobrevolando la primera de las cinco líneas definidas. Este valor se incrementa en 1 cada vez que la aeronave cambia de línea, llegando a un máximo de 6. La aeronave cambia a la línea siguiente si se activa la alarma de alguno de los sensores que está estudiando.

- *Batería*. A la variable *batería* se le da valor 0 cuando la carga de la batería de la aeronave es suficiente para completar el tramo que está sobrevolando y su vuelta a la base, quedando un 20% de la batería como margen de seguridad, y valor 1 si no se cumplen alguna de estas condiciones.

- *Alarma*. La variable *alarma* vale 0 mientras que los sensores de temperatura no detecten fuego, pasa a valer 1 cuando lo detectan. Cada sensor, da un valor de *alarma* propio cuando la aeronave lo interroga, es suficiente la activación de la alarma de un solo sensor para que la aeronave cambie de línea.

- *Ultimowp*. Esta variable contiene al último punto de la ruta en cada momento, de forma que, si se ha activado la alarma, el último punto de la ruta es el punto en el que se haya interrogado al sensor que haya detectado el fuego. Por otra parte, si el valor de la variable *batería* ha pasado de 0 a 1, el último punto de la ruta en ese momento es la base.

- *Stotal*, que equivale a la distancia total recorrida. Este parámetro es fundamental puesto que a partir de él se calcula el tiempo de duración de la batería, se iguala a 0 cada vez que la aeronave vuelve a base.

El programa selecciona los puntos de la línea indicada por la variable *elipse*, y almacena sus latitudes y longitudes en los vectores *latitud* y *longitud*. El sentido de ambos vectores se decide según la distancia al último punto de la ruta en ese momento, por ejemplo, si el último punto de la primera línea es más cercano al último punto de la segunda, se invierten los vectores *latitud* y *longitud* para mejorar el rendimiento del vuelo de la aeronave.

A partir de estos vectores, se programa la ruta que describe una elipse que se repite indefinidamente. Para crearla el programa llama a la función *crearelipse*, que, además de devolver la simulación en Google Earth, también proporciona el valor de las variables *batería*, *alarma* y del último punto de la ruta.

El programa saldrá de este bucle en dos situaciones:

- Cuando la variable *batería* valga 1, creando previamente un arco de vuelta a base.

- Cuando la variable *alarma* valga 1 porque uno de los sensores detecte fuego.

En el primer caso, la aeronave regresa a base, intercambia la batería y vuelve a recorrer la primera elipse, en el segundo, se le suma 1 al valor de la variable *elipse* y se inicia de nuevo todo el proceso comenzando en la segunda línea.

A continuación, se muestra el pseudocódigo de la función *ruta_de_vigilancia*:

INICIO

```

Lee las coordenadas reales de los sensores
Inicializa elipse=1
Mientras elipse<6
    Selecciona los puntos de la línea actual
    Alarma=0
    Mientras alarma=0
        Batería=0
        Reordena los puntos de la línea
        Crea una línea que une el último punto de la línea anterior
        con el primer punto de la línea actual
        Mientras alarma=0 Y batería=0
            Llama a la función crearelipse
        Fin de mientras
        Si alarma=1
            elipse=elipse+1
            Escribe cambio a la línea=elipse
        Fin de si
        Si batería=1
            stotal=0
        Fin de si
    Fin de mientras
Fin de mientras
Si elipse=6
    Vuelve a base
    Escribe Ruta terminada
Fin de si
FIN

```

Pseudocódigo de la función ruta_de_vigilancia

4.2.2. Funciones secundarias

Las funciones secundarias ayudan a las principales a completar sus procesos. Son: *reordena*, *arco_vuelta*, *crear_elipse* y *calcula_batería*. Las dos primeras son llamadas por la función principal *ruta_de_reconocimiento*, y las siguientes por *ruta_de_vigilancia*.

1. *Reordena.m*

Reordena es la primera función a la que llama *ruta.de.reconocimiento*. Esta función es fundamental para realizar todo el recorrido, ya que ordena los puntos de las líneas de defensa según el orden de paso de la aeronave.

La entrada de la función es la estructura *plan1*, de la que extrae los datos de las líneas, y sus salidas son los vectores *latitudes2*, *longitudes2*, que almacenan las coordenadas de los puntos ordenados, y el vector *wparcos*, que contiene los números de los *waypoints* en los que se producen el cambio de línea.

En el siguiente pseudocódigo se observan los pasos que sigue para realizarlo:

INICIO

Desde la primera línea hasta la última

 Almacena las coordenadas de los puntos de cada línea en los vectores *latitudes* y *longitudes*

 Almacena el número de puntos por línea en el vector *nwplinea*

 Almacena los puntos en los que ocurre el cambio de línea en el vector *wparcos*

Fin de desde Desde 1 hasta el número de arcos

 Calcula la distancia (*s1*) del último punto de la línea actual al primer punto de la siguiente

 Calcula la distancia (*s2*) del último punto de la línea actual al último punto de la siguiente

Si $s1 < s2$

 Guarda los puntos en el orden actual en los vectores *latitudes2* y *longitudes2*

Si no

 Invierte el orden de los puntos y los guarda en los vectores *latitudes2* y *longitudes2*

Fin de si

Fin de desde

FIN

Pseudocódigo de la función reordena

Además, la función *reordena* incluye una demostración gráfica de su correcto funcionamiento en Google Earth, que ha sido comentada en el código para evitar que interfiriese con el resto de la simulación.

2. *Arco_vuelta.m*

Esta función crea un arco que conecta el último punto de la ruta de reconocimiento con el punto más cercano de la primera línea. Durante este trayecto no se recibe información de ningún sensor, únicamente es un enlace con la ruta de vigilancia.

Sus entradas son los *waypoints* de la ruta de reconocimiento (*wpreconocimientoreal*), el número de sensores por línea (*nsensorlinea*) y la distancia total recorrida (*stotal*)

y su salida es el valor actualizado de la distancia total recorrida (*stotal*).
En el pseudocódigo siguiente se observa los pasos que sigue para realizar el arco de vuelta:

INICIO

```
Lee los puntos de la ruta de reconocimiento
Calcula la distancia (s1) del último punto de la ruta de reconocimiento
al primero de la primera línea
Calcula la distancia (s2) del último punto de la ruta de reconocimiento
al último de la primera línea
Si s2<s1
    Invierte el orden de los puntos de la primera línea
Fin de si Crea un arco que conecte la última línea con la primera
FIN
```

Pseudocódigo de la función arco-vuelta

3. *Crear_elipse.m*

La función *crear_elipse* es llamada por *ruta_de_vigilancia*. Sus entradas son:

- Las coordenadas de los puntos de la línea que va a controlar, almacenadas en los vectores *latitud* y *longitud*.
- Las coordenadas de la base: *latbase* y *lonbase*.
- El número de la línea que está controlado, que viene dado por la variable *elipse*.
- El número de sensores que hay en cada línea, *nsensorlinea*.
- La distancia total recorrida, que está almacenada en dos variables diferentes: *stotal* y *stotalhora*. La primera se reinicia cada vez que la aeronave vuelve a base a recargar la batería y la segunda se utiliza para calcular hora teniendo así control de qué ocurre en cada momento de la noche.

La función calcula las coordenadas de la elipse a partir de los valores de las coordenadas de los sensores y antes de recorrerla, para cada tramo de la ruta, comprueba que la carga de la batería es suficiente, llamando a la función *calcula_bateria*. Si la batería es suficiente para realizar la elipse completa, la aeronave sobrevuela puntos e interroga a los sensores de forma indefinida, y si no es suficiente, el programa guarda el waypoint en el que la aeronave debe volver a base y realiza la ruta interrogando a los sensores previos.

En ambos casos cada sensor devuelve un valor de la variable *alarma*, si es 0, los sensores no han detectado fuego y la aeronave sigue realizando la ruta; si es 1, el sensor ha detectado fuego y la aeronave debe cambiar de línea. En el programa, esto se ve reflejado en que se abandona el bucle y vuelve a la función principal *ruta_de_vigilancia*.

Las salidas de esta función son: *alarma*, *batería* y *ultimowp*.

INICIO

```
Lee los puntos de la línea
Calcula la distancia (s1) del primer punto a la base
Calcula la distancia (s2) del último punto a la base
Desde 1 hasta el número de puntos
    Calcula su proyección en la elipse
    Si s1<s2
        Calcula la distancia (s) desde el waypoint actual hasta el primer
punto
        svuelta=s1+s+stotal
    Si no
        Calcula la distancia (s) desde el waypoint actual hasta el último
punto
        svuelta=s2+s+stotal
    Fin de si
    Calcula el valor de batería a partir de svuelta
    Guarda el número del último punto en wpvuelta
    Si batería=1
        Sale del bucle
    Fin de si
Fin de desde
Desde 1 hasta el valor de wpvuelta
    Crea el waypoint de la elipse
    Interroga al sensor asociado
    Si alarma=1
        Guarda el número del último punto en wpvuelta
        Sale del bucle
    Fin de si
Fin de desde
Si batería=1 Y alarma=0
    Vuelve a base
    Guarda como último punto la base
Fin de si
FIN
```

Pseudocódigo de la función crear_elipse

4. *Calcula_bateria.m*

Esta función calcula el tiempo de vuelo que le queda a la aeronave a partir de la distancia total recorrida (*stotal*), y devuelve 0 si la batería es suficiente para completar el tramo y 1 si no lo es. Las condiciones para que devuelva 0 son:

- La aeronave puede completar el tramo actual.
- La aeronave puede volver a base.
- Después de estas dos operaciones, la carga de batería es de al menos un 20 % de su total.

Esta última condición se ha establecido como margen de seguridad, la carga máxima de la batería es de 3 horas y realizando los cálculos sólo con el 80% de la batería, la aeronave dispone de 36 minutos adicionales. El cálculo del tiempo de batería es directo, ya que se ha considerado la velocidad de vuelo constante e igual a 50 km/h y la velocidad del viento despreciable.

INICIO

```
Lee la distancia total recorrida (stotal)
Calcula el tiempo de vuelo
Establece el tiempo máximo de la batería en 144 min
Si tiempo de vuelo < tiempo máximo de la batería
    Batería=0
Si no
    Batería=1
Fin de si
FIN
```

Pseudocódigo de la función calcula_batería

4.2.3. Funciones básicas

Llamamos funciones básicas a las que se han obtenido de la *toolbox "Mapping"*, la mayoría han sido modificadas para adaptarlas a nuestro código:

- *Routekml_read*. Se utiliza para transformar el archivo *líneas_de_fuego.kml*, que contiene las líneas de vigilancia trazadas por el bombero, a una estructura con la que pueda operar Matlab, es decir, convierte archivos *kml* a estructuras con los campos: nombre, latitud, longitud y altitud...

- *Sex2dec*. Convierte a grados las coordenadas dadas en grados, minutos y segundos.

- *Kmlwrite_point* y *kmlwrite_polyline*. Estas funciones crean un punto y una línea, respectivamente a partir de las coordenadas de un *waypoint* o un conjunto de *waypoints*, y los atributos especificados por la función *create_attr*.

- *Create_attr*. Define las características de las líneas o el punto a dibujar en Google Earth, incluye el color de la línea y su grosor, las etiquetas de los puntos, sus colores y símbolos entre otros.

- *Orto_distanzi*. Obtiene la distancia entre dos puntos y su rumbo a partir de sus coordenadas en LLA.

- *Orto_reckon*. Obtiene las coordenadas de un punto a partir las coordenadas de otro, una distancia y un rumbo.

- *Circle*. Crea una sección circular a partir de las coordenadas del centro, un radio, un ángulo inicial, un ángulo final y un número de puntos.

- *Create_wp*. Crea un *waypoint*, que es una estructura con los campos: nombre, latitud, longitud, y altitud.

5. Resultados y discusión

En la sección anterior se ha descrito el código de la ruta elegida para el drone Repetidor en el incendio de Cortes de Pallás. En este apartado se visualiza esta ruta en Google Earth, y se analizan sus características en las gráficas. Más tarde, se compara con las rutas expuestas en el apartado [3](#): Análisis del problema.

5.1. Simulación en Google Earth

La figura [16](#) muestra el recorrido del drone cuando realiza la ruta de reconocimiento. Comienza en la estación base (en la figura [16](#) indicada con una chincheta amarilla) y continúa sobrevolando la primera línea. En ella, interroga a los sensores (triángulos en la figura) y al llegar al último, realiza un arco de giro para pasar a la siguiente línea. La aeronave sigue este procedimiento hasta llegar al último sensor de la quinta línea, dónde realiza un arco más amplio (arco azul oscuro en la figura) para regresar a la primera línea.



Figura 16: Ruta de reconocimiento del drone Repetidor.

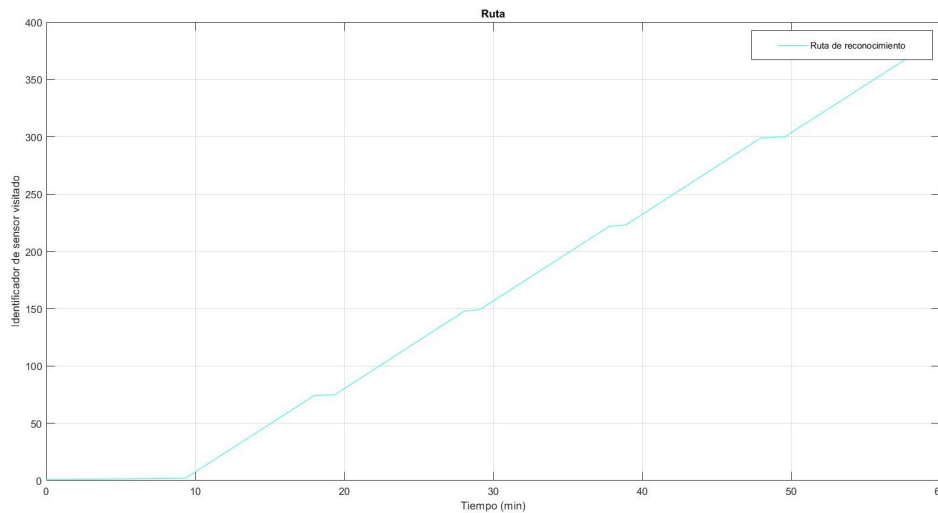


Figura 17: Gráfica de la ruta de reconocimiento del drone Repetidor

Además de esta visualización, el programa también devuelve la figura [17](#). En ella se observa a qué sensor interroga la aeronave en cada momento, y a cada sensor se le asocia un número como identificador. En la ruta de reconocimiento la aeronave recorre todos los

sensores. Como el dron vuela a velocidad constante y los sensores están equiespaciados, la gráfica es prácticamente lineal. Los tramos constantes corresponden a los arcos de giro, en los que no se interroga a ningún sensor. Esta gráfica se actualiza conforme el dron avanza en su recorrido.

Completada la ruta de reconocimiento, el dron Repetidor inicia la ruta de vigilancia. Parte del último punto del arco de vuelta (arco azul oscuro en las Figuras 17 y 18), y como se puede observar en la figura 18, la aeronave sobrevuela los sensores trazando una elipse, cuyo eje mayor es la longitud de la primera línea. El dron recorre la ruta en sentido horario y la flecha azul de la figura indica qué semielipse sobrevuela en cada momento.



Figura 18: Tramo de la ruta de vigilancia

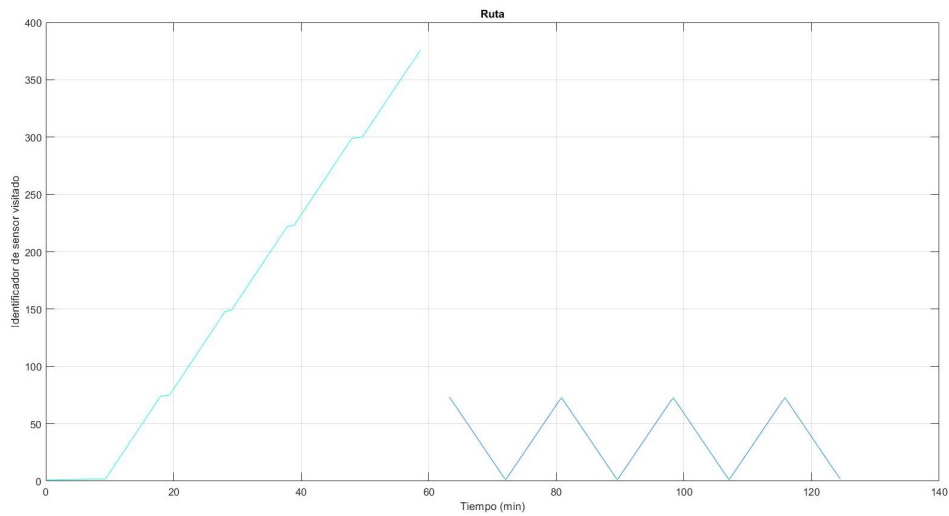


Figura 19: Gráfica hasta el minuto 126 de la ruta de vigilancia

La figura 19 muestra la relación entre los sensores interrogados y el tiempo transcurrido en el tramo de la ruta de vigilancia anterior (figura 18). Como se puede apreciar en la gráfica, los sensores identificados con los números del 1 al 70 aproximadamente, se encuentran en la primera línea. En el recorrido de cada semielipse la aeronave interroga a todos los sensores de la línea, por lo tanto, cada línea azul oscura de la gráfica corresponde a una semielipse completada. Así, en este instante de la simulación, el dron Repetidor ha realizado 2 elipses y media.

La aeronave continúa sobrevolando esta elipse hasta que se da alguna de las siguientes

situaciones:

- a Un sensor de la línea detecta fuego. Si mientras interroga a los sensores, uno de ellos le informa de la aparición de fuego, la aeronave interrumpe su ruta y se traslada a la línea siguiente. Como se observa en la Figura 20, la línea roja, indica este desplazamiento, además, la aeronave elige por dónde iniciar el recorrido de la siguiente línea según el punto más cercano en ese momento (en la figura 20 a el extremo izquierdo y en la b el extremo derecho). Una vez posicionado en la línea, el dron comienza el recorrido de la nueva elipse.



(a) Inicio del estudio de la nueva línea por el extremo izquierdo



(b) Inicio del estudio de la nueva línea por el extremo derecho

Figura 20: Cambio de línea por fuego

- b La batería de la aeronave es demasiado baja. En este caso, el dron recibe un aviso interno de que debe volver a base. La línea naranja de la figura 21 a equivale a este recorrido de vuelta. Una vez ha intercambiado su batería, la aeronave regresa a la línea que estaba estudiando y continúa recorriendo la elipse. La línea negra de la figura 21 b corresponde al tramo de salida de base.

Estas operaciones también se representan en la gráfica, la figura 22 muestra la ruta desde su inicio hasta que un sensor de la línea 3 da la señal de alarma. Las líneas rojas corresponden a la situación a. Aunque sólo el último sensor ha detectado fuego, se trazan todos los puntos de esa semi-elipse para facilitar la visualización. Así, en la gráfica se observa que en la primera línea de defensa el sensor número 10 en el minuto 195 aproximadamente da la alarma, en la segunda el número 85 en el minuto 290 y, en la tercera el 180 en el minuto 370. En cuanto a las líneas naranjas que simulan la situación b, ocurre lo mismo, en el último sensor indicado es en el que la aeronave decide volver a base por falta de batería.



(a) Vuelta a base



(b) Salida de base

Figura 21: Operación de cambio de batería

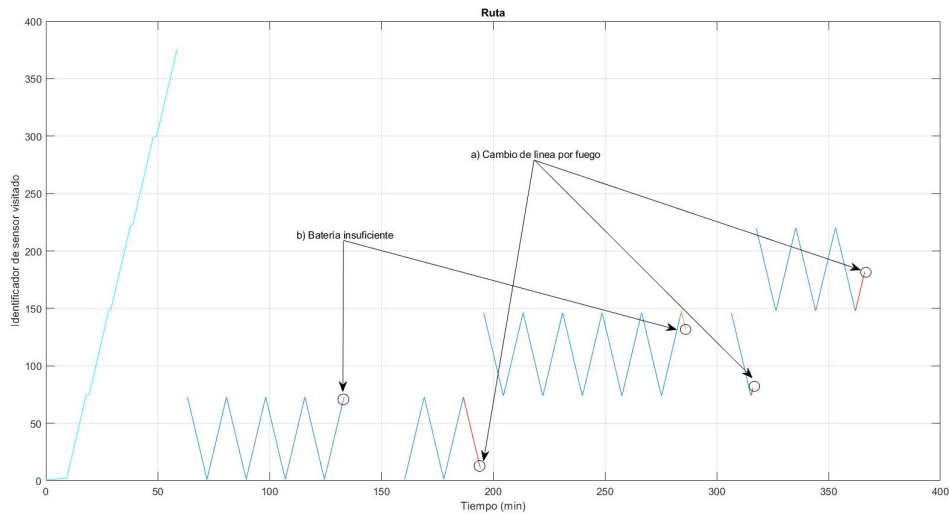
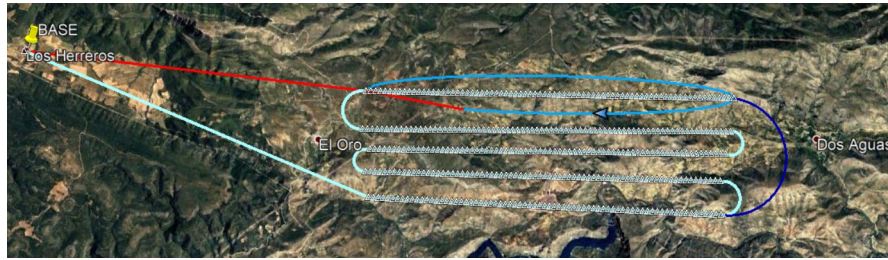


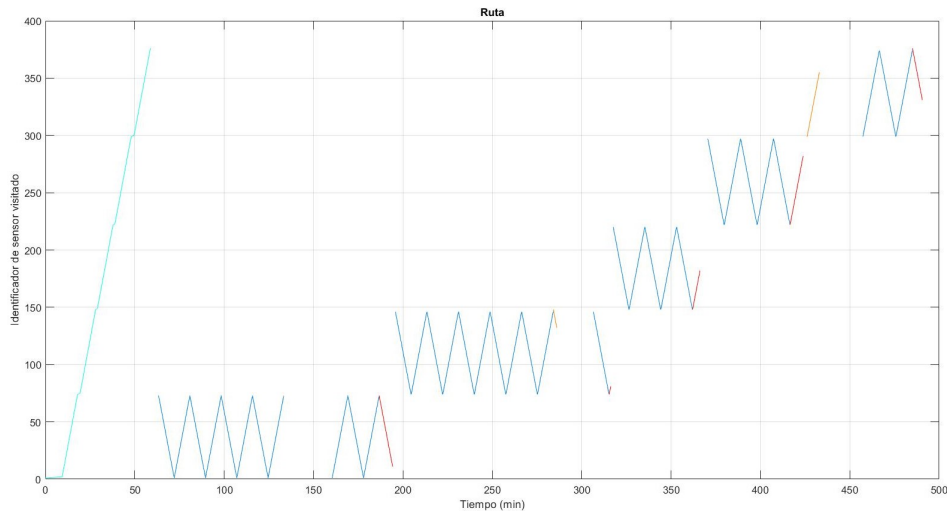
Figura 22: Gráfica hasta el minuto 370 de la ruta de vigilancia

Cuando la aeronave recibe el aviso de fuego se desplaza a la siguiente línea, como se puede observar en la figura 22, cambia de la línea 1 a la 2, pasando de controlar los sensores 1-70 a los sensores 70-150 aproximadamente. Cuando pasa a la línea 3 vigila los sensores 150-225. Temporalmente, apenas se aprecia el cambio de línea ya que la aeronave sólo tarda de 2 a 5 minutos en desplazarse a la línea siguiente.

Por último, en la Figura 23 a) se muestra la vuelta final a base de la aeronave debida a la alarma de un sensor de la última línea, esta es la última operación de la ruta. La figura 23 b) corresponde a la ruta completa que realiza el dron Repetidor.



(a) Vuelta final a base



(b) Gráfica completa de la ruta del drone Repetidor

Figura 23: Ruta y gráfica final de la ruta del drone Repetidor

Cada vez que se realiza la simulación, los sensores en los que se activa el fuego cambian, lo que provoca que las rutas y las gráficas resultantes sean ligeramente diferentes.

5.2. Análisis de la ruta

A partir de los datos de esta simulación, se han elaborado una serie de gráficas para analizar algunos parámetros de esta ruta:

- Distancia del drone al sensor interrogado.

La figura 24 muestra la distancia de la aeronave al sensor que interroga en cada momento. Vienen representadas la ruta de reconocimiento (puntos azules oscuros) y la ruta de vigilancia (puntos azules claros). En la ruta de reconocimiento, la aeronave sobrevuela a los sensores, por lo tanto, la distancia del drone a los sensores es la altura de vuelo de la aeronave (80 metros).

En la ruta de vigilancia, la distancia a cada sensor varía, ya que la aeronave traza una elipse y elige interrogar al sensor que se encuentra más cerca en cada momento. Como se

observa en la figura, al igual que en la ruta de vigilancia, la distancia mínima a la que interroga al sensor es la altura de vuelo. Este caso se da cuando la aeronave sobrevuela el eje mayor de la elipse. Esto sólo ocurre cuando empieza o finaliza una semielipse.

Por otra parte, los puntos representados en la gráfica con $y=0$ corresponden a la vuelta a base de la aeronave (puntos naranjas en la figura), al cambio de línea por fuego (puntos rojos en la figura) y a los arcos de cambio de línea durante la ruta de reconocimiento. En ninguno de estos casos se interroga a los sensores, pero para facilitar la comprensión de la ruta, se han incluido en la gráfica con una distancia imposible para el drone (con una distancia $y=0$ la aeronave volaría a ras del suelo).

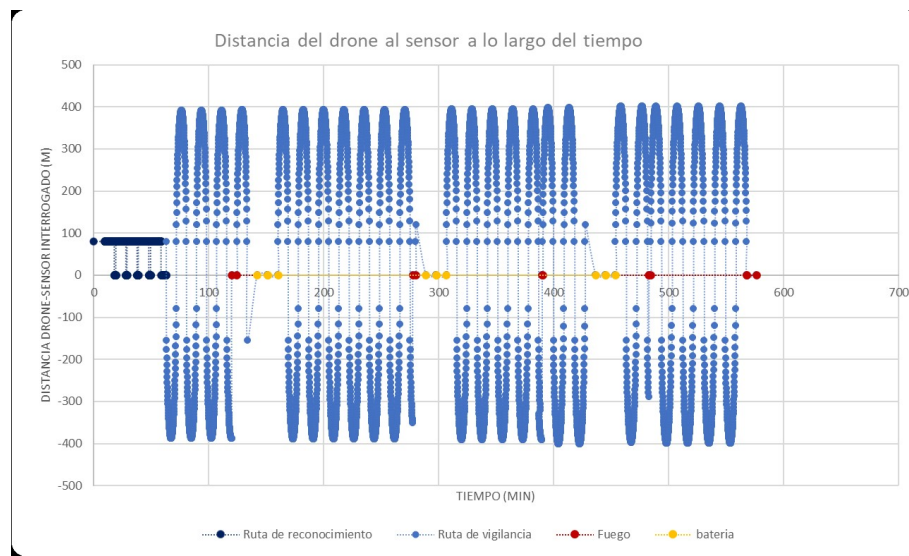


Figura 24: Gráfica de la distancia del drone al sensor a lo largo del tiempo

- Tiempo de vuelo útil

Por otra parte, para comprobar la eficiencia de la ruta, también se estudia el tiempo de vuelo útil. En la gráfica anterior se podía observar el tiempo de vuelo total, de 9 horas y 36 minutos, sin embargo, el tiempo de vuelo útil sólo contabiliza el tiempo en el que se obtiene información de los sensores. El tiempo empleado en realizar el resto de operaciones se considera tiempo de vuelo no útil.

La figura 25 muestra los porcentajes de tiempo de vuelo útil y no útil, la aeronave recibe información el 86,04 % del tiempo y el 13,96 % restante lo utiliza en:

- Desplazarse a base para intercambiar la batería y volver a la línea de nuevo.
- Cambiar de línea por la activación de fuego.
- Realizar arcos de giro para cambiar de línea en la ruta de reconocimiento.

El tiempo de vuelo útil de esta ruta es de 8 horas y 15 minutos y el no útil de 1 hora y 20 minutos. Aunque son porcentajes aceptables, se podrían mejorar acercando la base a la zona de fuego, ya que la vuelta a base para cambiar la batería es la operación que requiere más tiempo.

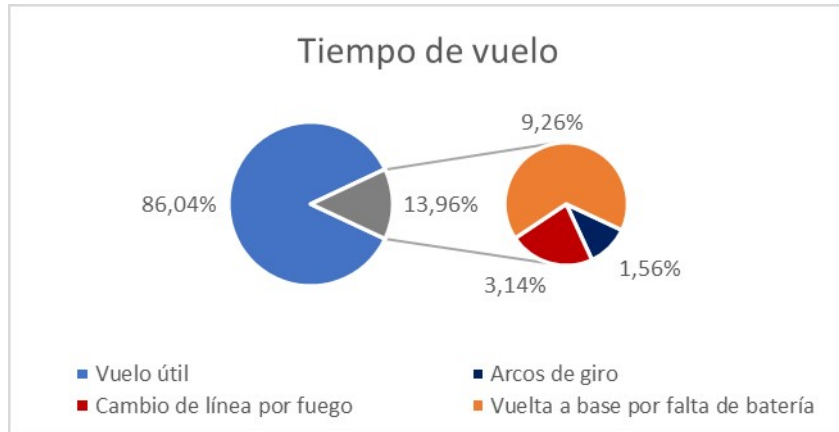


Figura 25: Porcentajes de tiempo de vuelo

- Números de recargas necesarias.

Para comprobar que efectivamente se cumple el requisito de seguridad de la batería, se ha incluido la gráfica que muestra el porcentaje de batería a lo largo del tiempo. Como se puede observar, en ningún caso el valor de la batería disminuye por debajo del 20 % de su total. En todo el recorrido, la aeronave vuelve a base a intercambiar su batería 3 veces (en la gráfica los tres puntos en los que la batería vuelve a tener el valor del 100 %). En esta simulación no se ha tenido en cuenta el tiempo que se tarda en intercambiar la batería de la aeronave, se ha considerado despreciable al ser inferior a 1 minuto. Además, en una situación real se tendría la opción de disponer de varios drones, de forma que cuando volviese uno a base, saliese otro.

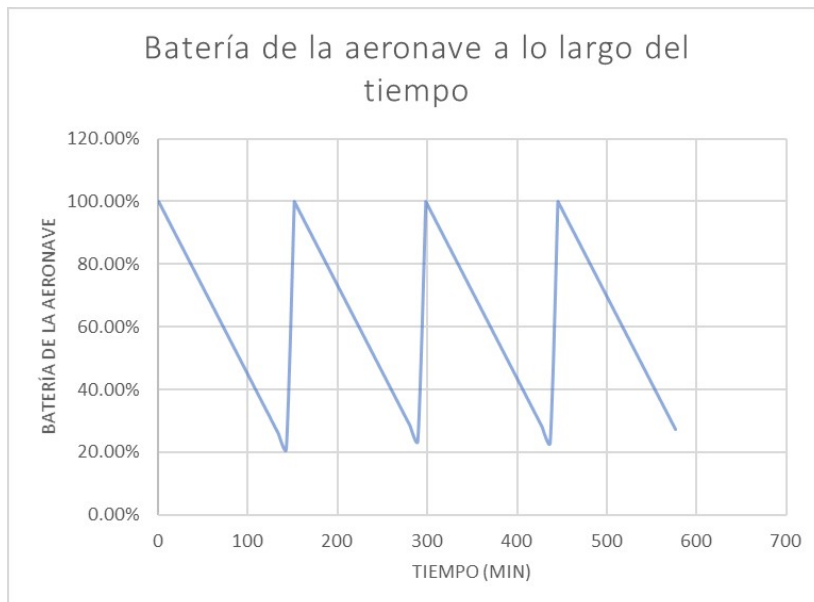


Figura 26: Batería de la aeronave a lo largo del tiempo

Así, según los datos obtenidos, la distancia máxima de la aeronave al sensor de estudio es de alrededor de 400 m, el tiempo de vuelo útil es de 8 horas y 15 minutos y la aeronave necesita 3 cambios de batería para realizar la ruta completa.

5.3. Comparativa entre rutas

Una vez analizada la ruta elegida, se va a discutir por qué esta ruta es la más adecuada para el incendio escogido, comparándola con las rutas propuestas en el apartado 3.

Se comparan por separado las rutas 1, 2 y 3 y las rutas 4, 5 y 6. Las primeras estudian la evolución del incendio evaluando cada línea por orden, según la aparición del fuego. En las segundas, la aeronave realiza un barrido general por todos los puntos. La Figura 10 muestra estas rutas representadas en Google Earth.

En primer lugar, se analizan las rutas 4, 5 y 6. En estas rutas, la aeronave interroga a todos los sensores, y al detectar fuego vuelve a base y finaliza la operación. Las gráficas que se van a estudiar analizan los parámetros de estas rutas a partir de un tramo del recorrido en el que la aeronave interroga a los sensores dos veces (ida y vuelta).

La Figura 27 muestra la distancia del dron al sensor que interroga a lo largo del tiempo para las tres rutas.

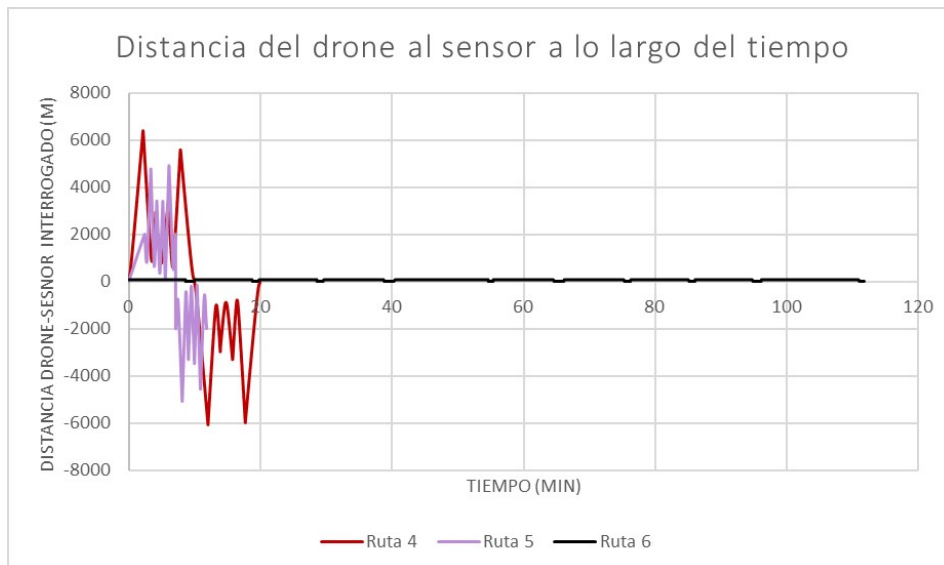


Figura 27: Distancia del dron al sensor interrogado a lo largo del tiempo para las rutas 4, 5 y 6

La ruta 4 tarda aproximadamente 20 minutos en recorrer todos los sensores (ida y vuelta), la ruta 5, tarda la mitad de este tiempo, 10 minutos, y la ruta 6, tarda más de 1 hora y media. Tanto la ruta 4 como la ruta 5 son más eficientes que la ruta elegida en cuanto al tiempo empleado en recorrer todos los sensores.

Sin embargo, si se observa el *eje y* de esta gráfica, se aprecia que la distancia de la aeronave a algunos sensores, es mayor que el rango de los sensores (2 km). Por lo tanto, estos sensores no podrán comunicarse con la aeronave.

Para observar con más claridad estos valores, se representa la figura 28 que muestra la distancia del dron al sensor que interroga. Tanto en la ruta 4, como en la 5, hay un número considerable de sensores que se encuentran fuera del alcance de la aeronave. En la ruta 6, por el contrario, la aeronave siempre vuela dentro del alcance de los sensores.

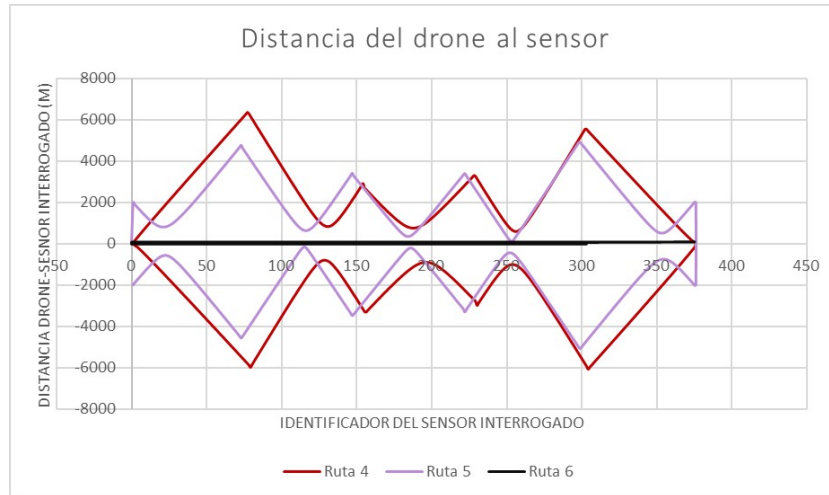


Figura 28: Distancia del dron al sensor interrogado para las rutas 4, 5 y 6

De hecho, graficando los porcentajes de tiempo que permanece la aeronave en contacto con los sensores (Figura 29), se observa que en la ruta 4 únicamente se encuentra dentro del alcance del sensor a interrogar un 41.83% del tiempo, y en la ruta 5 un 52.99%.

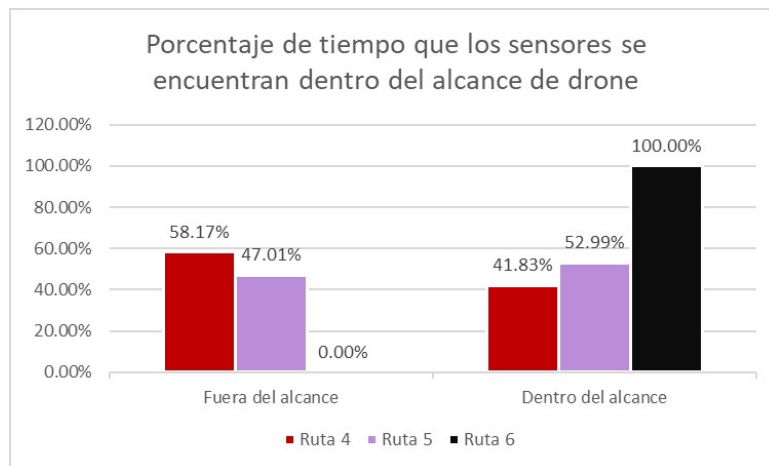


Figura 29: Porcentaje de tiempo que los sensores se encuentran dentro del alcance del dron

Además, en estos porcentajes no se incluye la posibilidad de que haya obstáculos en el

terreno que impidan la conexión, por lo tanto en una situación real estos valores podrían ser mayores.

Por este motivo principalmente, se descartan las rutas 4 y 5 para esta simulación, ya que no se considera viable tener información sólo durante esos porcentajes de tiempo y únicamente de los sensores más cercanos. En otro incendio con características diferentes (terreno regular o con pendientes suaves) o en este mismo incendio, pero con otras líneas de defensa (menos extensas y más cercanas), se podría considerar utilizar estas rutas.

La ruta 6, también se descarta. La gráfica 30 muestra el porcentaje de batería consumido de las rutas. Esta ruta, en el tramo de ida y vuelta, se consume un 62 % de batería, teniendo en cuenta que cuando llega al 80 % la aeronave vuelve a base a intercambiar la batería, solo podría realizar un recorrido completo.

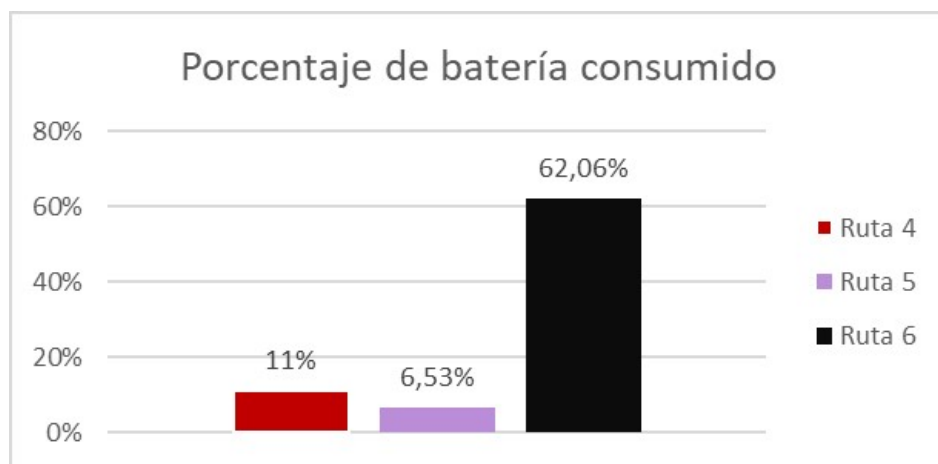


Figura 30: Porcentaje de batería consumido en las tres rutas

Una vez descartadas las rutas 4,5 y 6, se pasa a analizar las rutas 1, 2 y 3. Estas rutas estudian la evolución del incendio línea por línea, empiezan por la primera y cuando los sensores detectan fuego, cambian a la siguiente.

Siguiendo los mismos pasos que para el análisis de las rutas anteriores, se representa en la figura 31 la distancia del dron Repetidor al sensor que interroga a lo largo del tiempo para las tres rutas.

Como se puede observar la aeronave tarda aproximadamente 17 minutos en recorrer la ruta 1, necesita 10 minutos para la ruta 2 y alrededor de 18 minutos para la ruta 3. En cuanto al tiempo de vuelo la ruta 2 es la más eficiente, ya que tarda casi la mitad de tiempo que las otras dos.

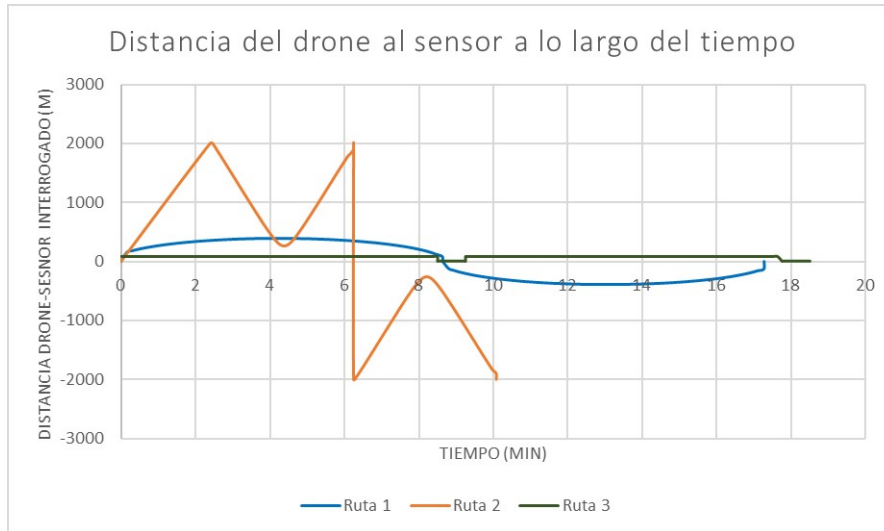


Figura 31: Distancia del drone al sensor interrogado a lo largo del tiempo para las rutas 1, 2 y 3

Sin embargo, si se analiza la distancia a los sensores en la figura 32, se observa que la aeronave, en la ruta 2, vuela a más de 1 km del sensor en aproximadamente la mitad de los casos. Teniendo en cuenta las características del terreno que dificultan la comunicación de la aeronave con el sensor: barrancos profundos, pendientes, obstáculos... se descarta esta ruta por la posibilidad de no recibir información de algunos sensores. Se trata de una elección subjetiva, ya que no se ha realizado un estudio del terreno en profundidad ni de la transmisión de la señal de los sensores, y no es posible afirmar que este terreno perjudique a la comunicación, pero tampoco se puede negar. En este trabajo, se antepone la precisión de la operación al tiempo de vuelo.

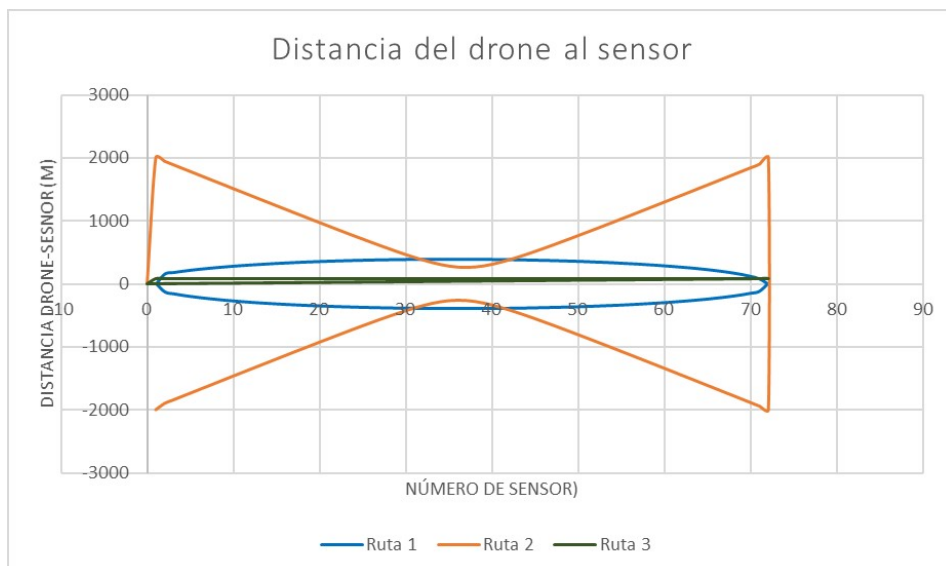


Figura 32: Distancia del drone al sensor interrogado para las rutas 1, 2 y 3

Finalmente se selecciona la ruta 1 sobre la ruta 3, ya que esta ruta tiene una duración menor y además, el tiempo de vuelo útil es del 100 %.

En definitiva, se selecciona la ruta 1 sobre el resto por cumplir con las siguientes características:

- Tiempo de vuelo útil. Cuando la aeronave recorre la ruta 1 utiliza todo el tiempo de vuelo en obtener información de los sensores.
- Precisión. En la ruta 1 la aeronave vuela a una distancia próxima a los sensores, lo que disminuye la probabilidad de no recibir información de alguno.
- Tiempo de recorrido. El tiempo que tarda en completar una semielipse es aceptable, en 10 minutos recibe la información de los sensores de la línea.

6. Presupuesto

En esta sección se describe el presupuesto necesario para la realización de este proyecto. Se incluyen los costes directos relativos al material utilizado y a los recursos humanos, y los costes indirectos.

6.1. Costes asociados al material

En este trabajo, los costes debidos al material son los costes de los programas informáticos utilizados. En la tabla 2 se muestran el software necesario y el coste de sus licencias:

RECURSO	COSTE (€)
Matlab Professional	800
Mapping Toolbox	1.000
Excel	149
LaTeX	0
Google Earth	0
Total	1.949

Tabla 2: Costes asociados al material

En esta tabla no se incluye el importe del dron Repetidor ni de los sensores de temperatura ya que durante el trabajo no se pudieron realizar las pruebas de vuelo.

6.2. Costes asociados a los recursos humanos

La tabla 3 contiene los gastos asociados a los recursos humanos. Se han dividido según las fases del proyecto.

RECURSO	FUNCIÓN	UNIDADES (h)	PRECIO UNITARIO (€/h)	COSTE (€)
Ingeniero aeroespacial	Diseño	35	30	1.050
Ingeniero aeroespacial	Programación	250	30	7.500
Ingeniero aeroespacial	Redacción	100	30	3.000
Total				11.550

Tabla 3: Costes asociados a los recursos humanos

6.3. Costes indirectos

En estos costes se incluyen aquellos que no están relacionados de forma directa con el proyecto como la electricidad consumida o la conexión a internet. Para este trabajo, se asumen que son el 12.5% de cada uno de los costes directos. Se recogen en la tabla 4:

RECURSOS	COSTE (€)	COSTE INDIRECTO (€)
Materiales	1.949	243,63
Humanos	11.550	1.443,75
Total		1.687,38

Tabla 4: Costes indirectos

6.4. Coste total

El coste total de este trabajo se muestra en la tabla 5:

DESCRIPCIÓN	COSTE (€)
Materiales	1.949
Recursos humanos	11.550
Costes indirectos	1.687,38
Total sin IVA	15.186,38
Total con IVA (21 %)	18.375,52

Tabla 5: Coste total

Así el valor económico del proyecto asciende a: #DIECIOCHO MIL TRESCIENTOS SETENTA Y CINCO EUROS CON CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS#

7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Conclusiones

El objetivo de este Trabajo de Fin de grado ha sido, tal y como se establecía en la introducción, diseñar una ruta de navegación aérea adecuada para el dron Repetidor para estudiar una zona concreta durante el incendio de Cortes de Pallás.

En primer lugar, se ha determinado el marco legislativo del proyecto ETHON, teniendo en especial consideración las operaciones durante la extinción de incendios. La realización de este estudio ha sido fundamental, ya que sin él no se podría afirmar desde el punto de vista legal, que el proyecto es aplicable a una situación real.

Durante la fase de diseño de la ruta del dron Repetidor se han propuesto 6 diseños diferentes para la ruta de vigilancia. El análisis de los parámetros de estas rutas ha demostrado que la ruta 1 es superior al resto, para las líneas de defensa especificadas. Para el mismo incendio, eligiendo otras líneas de defensa o para un incendio diferente este resultado no tiene por qué ser el mismo.

Una vez elegida la ruta, se ha realizado la programación en Matlab. En ella se incluye todo el proceso que habría seguido el dron Repetidor de haberse encontrado en el incendio de Cortes de Pallás durante la franja horaria escogida. Se han tomado como referencia los datos reales del avance del fuego, lo que permite saber aproximadamente, en qué punto de la ruta habría estado la aeronave en cada momento y la información que habría transmitido.

De todos los objetivos propuestos, los únicos que no se han podido cumplir han sido: la traducción del código al lenguaje de la placa de la aeronave y la prueba de vuelo, debido a la situación de Estado de Alarma decretado por la pandemia por coronavirus de los últimos meses.

Se concluye, por tanto, que el objetivo principal de este proyecto se ha cumplido, ya que la ruta de navegación elegida para el dron Repetidor se hubiese podido aplicar en el incendio de Cortes de Pallás. El resto de las rutas planteadas se podrían utilizar en otros casos, haciendo un estudio previo del terreno y de la situación, y siempre teniendo en cuenta las instrucciones del Jefe de Bomberos. Así, al final de este proyecto se obtiene una primera aproximación, a mejorar en proyectos futuros, de la ruta del dron Repetidor adaptable a cualquier incendio.

7.2. Conclusiones personales

La posibilidad de trabajar con un gran equipo de profesionales en un proyecto real, el proyecto ETHON, fue la principal motivación para elegir este Trabajo Fin de Grado.

Durante este trabajo se han realizado entrevistas con los miembros de la empresa UAV WORKS desarrolladora de la aeronave, con algunos de los participantes del proyecto ETHON y con uno de los bomberos que estuvo presente en el incendio de Cortes de Pallás. Además, datos como la evolución del fuego y el viento, se han obtenido del informe de este mismo incendio. Todo esto ha ayudado a que el proyecto se aproxime lo máximo posible

a la realidad.

Por otra parte, los resultados obtenidos han sido positivos, es decir, el dron Repetidor podría haber sobrevolado el área elegida recorriendo la ruta propuesta durante el incendio de Cortes de Pallás. Además, aunque para las líneas de defensa elegidas de este incendio se selecciona la ruta 1, todas las rutas diseñadas podrían ser aplicables en otras condiciones. De hecho, en una situación real, para saber cuál sería la más adecuada sólo habría que introducir las nuevas líneas de defensa en el archivo que genera la comparación de rutas y realizar un estudio del terreno.

Por último, es satisfactorio saber que los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo del grado se han aplicado de forma práctica en un proyecto de tanta importancia:

- Legislación del sector aéreo. En este trabajo es fundamental definir qué tipo de operaciones están permitidas, qué tipo de análisis se debe realizar para conseguir el permiso de AESA y qué certificación deben tener la aeronave y el piloto. Estas cuestiones se respondieron en asignaturas como Gestión del Espacio Aéreo II, Navegación, Cartografía y Cosmografía y Transporte, Navegación y Circulación aérea.
- Diseño de rutas aéreas. En asignaturas como Transporte, Navegación y Circulación Aérea, se utilizó Matlab para desarrollar rutas de navegación para aviones comerciales. En este proyecto se ha utilizado este concepto, aplicado en drones.
- Programación en Matlab. Desde el inicio del grado, Matlab ha sido una herramienta fundamental, utilizada en asignaturas como Informática, Matemáticas III, Control Automático o Ingeniería de los Sistemas de Navegación Aérea II, aparte de las ya mencionadas. Todo el proyecto ha sido programado en Matlab y además, se ha utilizado la librería *Mapping*, que fue introducida por primera vez en la asignatura: Transporte, Navegación y Circulación Aérea.

7.3. Trabajos futuros

En este proyecto se partía desde cero a la hora de diseñar la ruta y realizar la simulación, por ello, al tratarse de una primera aproximación, la propuesta de trabajos futuros es muy amplia. Estos trabajos se centrarán, sobre todo, en optimizar la ruta.

- Incluir en el código las imágenes captadas por la cámara térmica de la aeronave y establecer como condición de cambio de línea tanto la activación de la alarma del sensor como la imagen de fuego.
- Optimizar la ruta estableciendo una velocidad y una altura de vuelo variable teniendo en cuenta la velocidad y la dirección del viento.
- A partir del código de la ruta del incendio de Cortes de Pallás, crear un código adaptable a cualquier incendio, de forma que la aeronave, según los datos introducidos y los obtenidos del terreno pueda cambiar el tipo de ruta en pleno vuelo.
- Incluir la posibilidad de una base de operaciones móvil para optimizar el tiempo de vuelo útil.

- Desarrollar un enjambre de drones que pueda controlar varias zonas del incendio al mismo tiempo.
- Mejorar la visualización de la ruta en ArcGIS para facilitar la selección de las líneas de defensa.

Referencias

- [1] “Incendios forestales”, Greenpeace, España, inf. téc., 2020. dirección: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/bosques/incendios-forestales/> (visitado 31-05-2020).
- [2] “Los incendios forestales en España 1 de enero-31 de diciembre de 2019. Avance informativo”, Subdirección general de política forestal y lucha contra la desertificación, Madrid, España, inf. téc., 2019. dirección: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/avance_1_enero_31_diciembre_2019_tcm30-537398.pdf (visitado 31-05-2020).
- [3] “Nivel de preerminencia. Incendios forestales”, Generalitat Valenciana, Comunidad Valenciana, España, inf. téc., 2020. dirección: <http://www.112cv.gva.es/es/incendios-forestales> (visitado 31-05-2020).
- [4] “Incendios forestales”, Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, Madrid, España, inf. téc., 2020. dirección: <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/incendios-forestales/> (visitado 23-06-2020).
- [5] L. Newcome, *Unmanned aviation: A brief history of unmanned aerial vehicles*. 2004.
- [6] Eagle Vision. (2020). Technological resources, dirección: <http://www.eagleyevision.it/default-en.asp> (visitado 04-06-2020).
- [7] Embention, *UAS AS-III-Insight Robotics*, 2020. dirección: <https://www.embention.com/es/project/uas-as-iii-insight-robotics/> (visitado 01-06-2020).
- [8] Nitrofirex, *Soluciones: aviones no tripulados contra desastres naturales*, 2020. dirección: <https://www.nitrofirex.com/concepto> (visitado 01-06-2020).
- [9] Drone Hopper, *Sobre drone Hopper*, 2020. dirección: <https://drone-hopper.com/sobre-drone-hopper/> (visitado 01-06-2020).
- [10] Telefónica, *Drones Antiincendios*, 2019. dirección: <https://www.telefonica.com/es/web/sala-de-prensa/-/telefonica-realiza-con-exito-un-piloto-con-drones-basado> (visitado 01-06-2020).
- [11] UPV, *El proyecto ETHON*. dirección: <http://www.itaca.upv.es/proyecto-ethon/> (visitado 24-06-2020).
- [12] UAV WORKS, *Aeronave VALAQ*. dirección: <http://www.uavworks.es/concepto-uav-covertible/aeronave-valaq/>.
- [13] FLIR, *Cámara termográfica para drones*, 2020. dirección: <https://www.flir.es/products/vue-pro-r/> (visitado 02-06-2020).
- [14] PYRO, *El proyecto ETHON*, 2020. dirección: <http://www.pyro.es/ethon> (visitado 02-06-2020).
- [15] “EUR-Lex Reglamento(UE) 2018/1139”, EASA, Madrid, España, inf. téc., 2018. dirección: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1139&from=EN> (visitado 28-04-2020).
- [16] “BOE: Real Decreto 1036/2017”, Gobierno de España, Madrid, España, inf. téc., 2017. dirección: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-15721> (visitado 28-04-2020).

- [17] “JARUS-Rpas: JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)”, JARUS, inf. téc., 2019. dirección: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v2.0.pdf (visitado 28-04-2020).
- [18] “Seguridad aérea: Guía sobre el contenido del estudio aeronáutico de seguridad.”, AESA, Madrid, España, inf. téc., 2018. dirección: <https://www.seguridadaerea.gob.es/media/4629900/pendice-s-v1-guia-estudio-seguridad-sora.pdf> (visitado 28-04-2020).
- [19] AESA. (2018). Seguridad aérea: ¿Qué son los Vuelos Experimentales?, dirección: https://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/cias_empresas/trabajos/rpas/faq/default.aspx#r06 (visitado 28-04-2020).
- [20] “Seguridad aérea: Escenario estándar para vuelos con RPAS experimentales”, AESA, Madrid, España, inf. téc., 2018. dirección: https://www.seguridadaerea.gob.es/media/4630198/stsx01_rev1_tsa_3m.pdf (visitado 28-04-2020).
- [21] “112cv: Plan Especial frente al riesgo de incendios forestales.”, Generalitat Valenciana, Valencia, España, inf. téc., 2018. dirección: http://www.112cv.gva.es/documents/163565706/163566493/PE_Incendios.pdf/d615af2c-8655-4e39-9b0c-2ca4c251c1cf (visitado 07-06-2020).
- [22] “Informe post-incendio: Incendio de Cortes de Pallás 28/06/2012”, Generalitat Valenciana, inf. téc.
- [23] MathWorks, *Matlab product description*. dirección: https://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html (visitado 07-06-2020).
- [24] Google, *Google Earth Pro*. dirección: <https://www.google.com/intl/es/earth/> (visitado 07-06-2020).

A. Apéndice

A.1. Ficha técnica VALAQ-360

TECHNICAL SPECS

AIRCRAFT & PERFORMANCE

Wingspan	3000mm
Height (landed)	1100mm
Package dimensions	2000mm x 1000mm x 700mm
Empty Weight (including batteries)	14kg
Maximum Take-off Weight	25kg
Max efficiency cruise speed	70km/h – 37.8kn – 19.4m/s
Max cruise airspeed	90km/h – 48,6kn – 25m/s
Max wind resistance	30km/h – 16,2kn – 8,3m/s
Max service ceiling (ASL)	2500m

AUTOPILOT AND MISSION

Position Accuracy (during flight)	Vertical: $\pm 1m$ Horizontal: $\pm 3m$
Position Accuracy (hover with standard GPS)	Vertical: $\pm 0.5m$ Horizontal: $\pm 1.5m$
Position Accuracy (take-off and landing)	Vertical: $\pm 0.1m$ Horizontal: $\pm 0.2m$
Max mission waypoints	Up to 65000

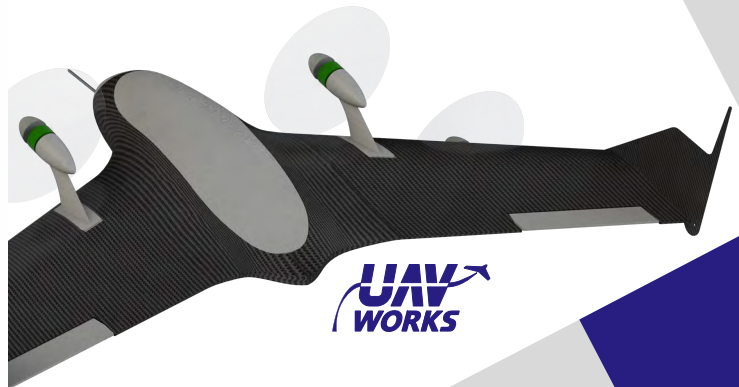
PAYLOAD

Max payload dimensions	300mm x 200mm x 200mm
Max payload weight	10kg
Max power consumption	60W (from onboard power supply)

COMMUNICATION AND STREAM LINKS

Transmission protocol	UDP (secured by password)
Max Bandwidth	20Mbps
Max on board camera stream resolution	1920 x 1080px
On board camera stream fps @ FHD	24fps
Data consumption by flight @ FHD	6GB

VALAQ-360



 uaworks.es

 info@uaworks.es

WHAT IS IT?

The VALAQ-360 is the perfect aerial tool for your needs. A combination of efficiency, endurance and capability. Designed for long flight times and large ranges in mind, it offers the combination of a regular vertical take-off and landing drone system (VTOL) with the power efficiency of a fixed wing, resulting in outstanding up to **6 hours continuous flights**.

The results of this concept are clear: longer flight times, mechanical simplicity and unrestricted infrastructure-limitation operation.

The VALAQ-360 is meant to be used as a high performance aerial platform or high demanding professional activities.

SURVEILLANCE & SECURITY

Equipped with the newest technology to perform any type of image capture mission:

- Target tracking within 500m range.
- Target geolocation (speed and direction).
- Simultaneous thermal image capture.
- High resolution live stream to the ground station



AERIAL MAPPING AND PHOTOGRAMETRY

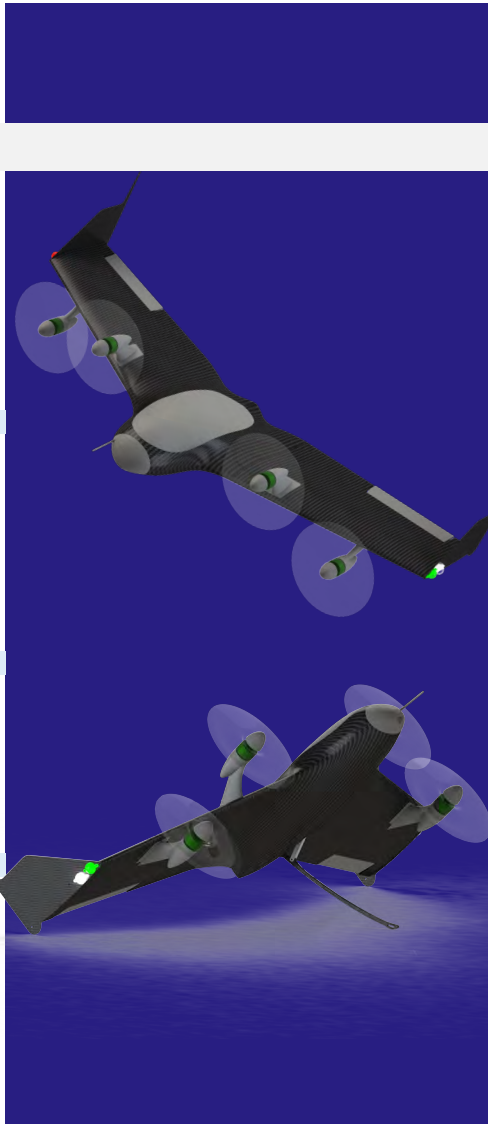
Great performance as multispectral, and high resolution image capture platform. With a large surface recognition up to 2000ha per flight. Mount any camera that fits your needs.

- 300mm x 200mm x 200mm dimensions.
- Up to 3kg to perform a 1000ha flight.

COURIER CARGO TRANSPORT

The versatility and efficiency of the VALAQ-360 makes it an ideal platform to perform long range cargo missions.

- Normalized 150km range with 3kg payload.
- Monitored mission both VLOS and BVLOS operation.
- Auto-drop system integration.
- Cargo gate for easy manipulation.



KEY FEATURES

- **Fully Autonomous Operation.** Don't worry about anything, the VALAQ-360 can perform any mission in full auto mode, just prepare the mission, arm and command start mission.
- **Longer flight times.** Up to 360 minutes with 3 kg maximum take-off weight.
- **No take-off and landing infrastructure required.** You can take-off and land anywhere, just like a regular multirotor.
- **High flight efficiency increase.** In fixed wing mode, the power consumption reduces up to 45% for an equivalent hovering system.
- **Mechanical simplicity.** Unlike other VTOL systems, the VALAQ-360 doesn't need pivoting motors and fixed wing flight extra propellers.
- **Low maintenance.** The full electric system with minimum mechanical parts translates into less maintenance and lower operational costs.
- **Control, communication and streaming over 4G.** All communications between the aircraft and the ground station are based on 4G, offering theoretical unlimited range.
- **In house design and manufacturing.** The aircraft has been developed inside the company by our Aerospace Engineers, searching for optimization and performance in every aspect of the VALAQ-360.
- **Full carbon fiber structure.** Highly optimized aerospace structure with custom manufactured panels and skin.
- **Laser altitude precision control.** Up to 120m with 1cm resolution and 10cm precision.
- **Collision avoidance.** The camera-based system rises the safety in any operation both manual and auto.
- **Precision take-off and landing.** The infrared beacon-based landing allows to land within 5cm.
- **Auto-drop system for cargo.** No landing needed if you require to drop your cargo in an specified location.