



# **ENTREGABLE 10:**

Informe HAPS: Análisis tipología de misiones, funcionalidades, de sistemas de cooperación para el desarrollo de futuros servicios.

(15/11/2022)







## Contenido

l.	lr	ntroducción
II.	E	stado del arte
Α		Introducción a los HAPS: High Altitude Permanent Platforms
В		Planificadores de trayectorias
III.	Α	lgoritmo
Α	•	Caminos de Dubins
В	•	Campo de visión (FoV)
C		Casos de uso
	1	. Inspección de punto1
	2	. Inspección de área 1
IV.	Si	imulación 1
	1	. Ejemplo 1: inspección de punto con 1 HAPS 1
	2	. Ejemplo 2: inspección de punto con varios HAPS1
	3	. Ejemplo 3: inspección de área con 1 HAPS 1
	4	. Ejemplo 4: inspección de área con varios HAPS1
V.	Ρ	rueba de concepto en Testbed1
Α		Primera aplicación: inspección de punto
В		Segunda aplicación: inspección de área 3 UAVs 2
C		Tercera aplicación: inspección de área 6 UAVs
VI.	C	onclusiones2





#### Introducción

El presente documento presentará los trabajos realizados a lo largo de la actividad 3.2.2 del proyecto HIBA, la cual esta dedicada al desarrollo de aplicaciones y utilidades derivadas de la simulación de vuelos de HAPS. En concreto, este entregable presenta un informe sobre las tipologías de misiones que podrían servir para futuras aplicaciones y servicios dentro de la agricultura de precisión.

Como se verá durante el documento, el potencial de estos vehículos llamados a conquistar el espacio aéreo entre los 20 y 40 km de altura es enorme para este tipo de aplicaciones, dando la posibilidad de monitorear tanto grandes como pequeñas extensiones de cultivo con cargas de pago mucho más baratas y modernas que los actuales satélites. De hecho, dicha carga de pago podrá adaptarse según las necesidades del usuario.

El documento presenta primero el estado del arte de dicha tecnología, dando así un contexto claro sobre el tipo de aeronaves. Más adelante, se presentará el sistema desarrollado: un sistema de gestión de trayectorias y misión para una flota de UAVs. el algoritmo desarrollado para ello ha sido el popularmente conocido como *Caminos de Dubins*, el cual permite simplificar la dinámica de la aeronave, pudiéndose así centrar el desarrollo en el estudio de un gestor de flota para dichos sistemas.

Por último, se presentan los resultados en simulación de dicho sistema, así como las pruebas reales realizadas a escala en el testbed de interiores del Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales (CATEC), en el cual se instaló un mapa a escala de Andalucía y se simuló el vuelo de HAPS con drones a escala.

## II. Estado del arte

A. Introducción a los HAPS: High Altitude Permanent Platforms

En la actualidad existe una zona del espacio por encima de los 20 kilómetros de altitud que no se encuentra aprovechada. En esta zona (Figura 1), también conocida como la estratosfera, es donde aparece el concepto de HAPS (High Altitude Permanent Platforms) o HAPs (High Altitude Platforms).

Estos pseudo-satélites son objetos voladores no tripulados que vuelan a grandes altitudes, que tienen como objetivo mantenerse en vuelo durante grandes periodos de tiempo, llegando a estar meses o incluso años en funcionamiento. De esta manera pueden trabajar mucho más tiempo realizando misiones de vigilancia o llevando las comunicaciones a otras zonas del planeta.











Figura 1: High Altitude Permanent Platforms

El concepto de HAPS se estudia desde hace muchos años. Su historia se remonta al siglo pasado, en los 30s ya se comenzaron proyectos que enviaban globos a la estratosfera. Posteriormente, sobre 1950-1960, se experimentó con aeronaves capaces de alcanzar altitudes estratosféricas. Finalmente, a partir de 1990 ya se lanzaban proyectos los cuales tenían como objetivo analizar las posibles aplicaciones de los HAPS en telecomunicaciones y accesos remotos.

Detrás de estos proyectos se encuentran muchas empresas famosas las cuales han diseñados sus propios HAPS. Entre ellos están Project Loon de Google, Zephyr de Airbus o Aquila de Facebook. Algunos de estos proyectos se muestran en la Figura 2.

	Proyecto	Año
	HiSentinel	1996
Sel.	ISIS	2004
S	HALE-D	2003
0	Stratobus	2010
	SPF	1998
5	Korean Airship	2000
	Project Loon	2012

	Zephyr 7	2001
	Solareagle	2008
Let	Helios	1994
MAN MAN	Aquila	2014
J. X	Solara 50	2013
-	Phantom Eye	2010
1	Global Observer	2007
The same of	Pathfinder	1983
4	EAV-3	2010





Figura 2: Histórico de proyectos HAPS

Los HAPS pueden clasificarse en dos tipos. El primer tipo se le conoce como LTA (Lighter Than Air) y corresponde a los vehículos HAPS que son más ligeros que el aire. El segundo tipo es el HTA (Heavier Than Air), que se refiere al vehículo HAPS que es más pesado que el aire. En la Figura 3 se muestran ejemplos de ambos tipos de HAPS. Por ejemplo, los globos aerostáticos o los dirigibles son ejemplo de LTA. Mientras que como ejemplo de HTA podrían ser vehículos no tripulados de ala fija. Existen ciertas ventajas de unos tipos respecto a otros pero su uso depende fundamentalmente de la aplicación que se le quiera dar al proyecto.





Figura 3: A la izquiera el Stratobus de Thales; a la derecha el Zephyr de AIRBUS

Estas aeronaves se encuentran entre el mundo de los satélites y el de los drones, pudiendo aprovechar las ventajas de ambos mundos y sacando el mayor partido a sus capacidades. Al operar a altas altitudes, unos 20 kilómetros de distancia con la tierra, estos vehículos pueden llegar a cubrir grandes distancias con su campo de visión. Además, no se encuentran tan alejados como los satélites habituales, los cuales están a más de 340 kilómetros. Por tanto, las imágenes realizadas desde los HAPS presentan mayor resolución asemejándose a las obtenidas con un dron. También se puede destacar de este híbrido entre satélite y dron que, al no estar tan alejado de la tierra, no provoca tanto retraso en las comunicaciones como ocurre en los satélites convencionales.

Para que estos pseudo satélites se mantengan mucho tiempo en vuelo necesitan aprovechar la energía solar. A través de paneles solares, recargan sus baterías a lo largo del día y utilizan la energía recolectada en la noche. Además de aprovechar la energía obtenida durante el día, estos vehículos realizan maniobras de ascenso y descenso para optimizar el uso de la misma. Por el día, los HAPS aprovechan la energía del sol para volar a las altitudes deseadas. Posteriormente, cuando llega la noche y el sol se oculta, los HAPS se dejan caer de forma controlada y, de esta manera, usan la menor cantidad de energía posible. Actualmente se ven condicionados por el avance de la tecnología.

Por otro lado, teniendo en cuenta las altitudes a las que vuelan estos vehículos, se observa que en ningún momento interrumpen o causan interferencias con el tráfico





aéreo existente en las zonas de vuelo. También, la franja del espacio por la que se desplazan estos vehículos tiene la ventaja de que no se ve afectada por corrientes de viento muy fuertes. Estas corrientes, conocidas como Jet Stream, se encuentran entre los 9 y los 16 kilómetros de altitud y complicarían el diseño y el funcionamiento de los pseudo-satélites. Además de estas fuertes corrientes de viento, también se evitan gran parte de los bancos de nubes que se encuentran en el cielo.

Una vez expuestas las características de este tipo de aeronaves, conviene indicar cuales son las posibles aplicaciones para las que servirían. Las misiones a las que pueden ir destinadas este tipo de aeronaves son muy variadas. A continuación se muestra una lista de ejemplos dónde los HAPS podrían tener una amplia repercusión. Éstas son:

- Defensa
- Vigilancia
- Ambiental/Urbano
- Navegación
- Telecomunicaciones
- Agricultura

Con respecto a esta última aplicación, estas aeronaves tienen un gran potencial en lo que a inspección, monitorización y vigilancia de grandes y pequeños terrenos se refiere. Ambas tipologías de HAPS, tanto de ala fija como dirigibles permitirán tener datos continuos de una plantación agraria.

## B. Planificadores de trayectorias

En la actualidad, el término de "Path Planning" ha sido muy utilizado en el mundo de la robótica. Estos algoritmos, de los que hay una gran variedad, buscan una sucesión de posiciones para un robot, que lo lleven desde un estado inicial a un estado final. Estas posiciones dependerán de la distribución de los obstáculos en el entorno. Además, también se tendrá que tener en cuenta la geometría del robot y su maniobrabilidad.

Los algoritmos planificadores se suelen diferenciar por la manera de buscar las mejores rutas, por su velocidad a la hora de generar las trayectorias o por la información previa que necesitan para construir esta ruta. Por lo general, lo más adecuado es identificar cuáles son las características del problema, y a partir de ahí, seleccionar el método para resolverlo.

Los algoritmos de planificación de trayectorias más actuales se caracterizan por obtener la mejor ruta posible o una ruta que se aproxime bastante a la anterior mencionada. Generalmente, la mejor ruta se refiere a la ruta óptima, la cual se consigue minimizando las funciones objetivo del problema. Por ejemplo, se pretende minimizar el tiempo total que se tarda en recorrer la ruta en misiones de búsqueda y rescate. Otro ejemplo podría





ser cuando se intenta minimizar la energía que utiliza el vehículo para recorrer la ruta como se puede observar para los casos de vuelos con HAPS.

Existen muchas formas de clasificar los algoritmos de planificación. En este trabajo se ha enfocado el estudio en algoritmos cuya planificación no sea dinámica, es decir, no existen obstáculos móviles. Y, además, se conoce el mapa sobre el que se va a trabajar incluyendo los puntos inicial y final. Estos serían los condicionantes para la búsqueda de un tipo de algoritmo de planificación efectivo para el propósito del trabajo. Un tipo de algoritmos que concuerdan con dichas especificaciones son los conocidos como "C Space Search Based Path Planning Algorithms". Dentro de ellos se puede distinguir entre "Graph Search" y "Sampling-Based". En la Figura 4 se muestra una serie de ejemplos pertenecientes a la categoría de algoritmos "Graph Search".

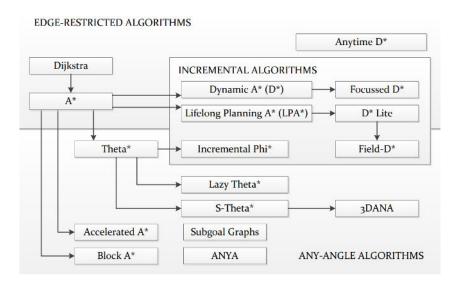


Figura 4: Algoritmos planificadores de trayectorias

Sin embargo, la categoría "Sampling-Based" parece que se ajusta más a las necesidades del presente trabajo. Dentro de ella se encuentra el algoritmo conocido como RRT (Rapidly Random Tree) (Figura 5). Este algoritmo planificador se basa en la construcción de un árbol de puntos que comienzan en el punto inicial y se va expandiendo hasta encontrar el punto final, Figura 1.6. Se le llama random o aleatorio por la forma en la que genera los waypoints por los que pasará el vehículo. Estas posiciones se conocen como nodos y se crean partiendo del nodo inicial. A partir de este, se elige un punto de forma aleatoria en el mapa, se extiende una rama desde el punto inicial en dirección al punto aleatorio y se crea un nodo a una distancia del nodo inicial elegida por el usuario. A continuación, se guarda el nuevo nodo y se sigue expandiendo el árbol de la misma manera hasta alcanzar el punto final. Una vez encontrado el estado final, se realiza una inspección para ver si existe un mejor camino según los nodos existentes.









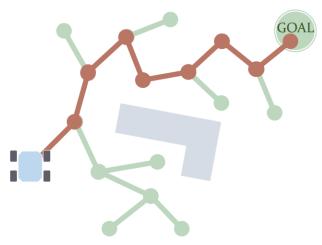


Figura 5: Algoritmo RRT

El presente trabajo se centrará en crear un algoritmo que diseñe las trayectorias que van a recorrer las aeronaves desde un punto inicial a un punto final, sin abordar el control del dron durante el vuelo. Los condicionantes de estas trayectorias son, en primer lugar, que no existan obstáculos en las mismas, y en segundo lugar, que la flota esté compuesta por aeronaves de ala fija. Esto último implica que las trayectorias no pueden tener giros bruscos ya que en este tipo de vehículos se necesita cierto espacio para poder maniobrar manteniendo la seguridad.

Debido a estas dos premisas, los algoritmos planificadores mencionados en este apartado, aun aportando mucha información, no se ajustan a las necesidades del proyecto. En un principio se comenzó creando trayectorias utilizando una variante del algoritmo RRT combinado con un tipo de curvas denominadas Caminos de Dubins. Pero dado la ausencia de obstáculos fijos o móviles, se observó que no era necesario recurrir a algoritmo de planificación que busquen el camino óptimo basándose en la distribución de los obstáculos. En el caso que se plantea en este trabajo, se le da más importancia a la maniobrabilidad de la flota de vehículos no tripulados y al tipo de elementos que se quieren visualizar. Por todo ello se decidió crear un algoritmo diferente, de creación propia.

## III. Algoritmo

En esta sección primero se hablará de dos conceptos muy importantes de cara al problema que se pretende resolver, que no es otro que el de ver la viabilidad del diseño de una gestión de flota coordinada para dos casos de uso potenciales en aplicaciones de agricultura. Estos dos conceptos son las curvas de Dubins y el campo de visión de una aeronave. Además de explicar a fondo estas dos ideas, se comentará como se pretenden incluir en el estudio que se desarrollará en el resto del capítulo. Posteriormente, se procederá a introducir los dos casos de uso seleccionados:

• Primero el caso de la inspección de un punto. En este problema, se tiene como objetivo vigilar un cierto punto en el mapa bajo unas condiciones de velocidad y tiempo.

•





• Por otro lado, también se explicará el segundo problema planteado en este trabajo, la inspección de un área. Al igual que en el primer caso, bajo unas restricciones de velocidad y de tiempo, se vigilará un área extensa sobre el mapa con un conjunto de vehículos no tripulados.

#### A. Caminos de Dubins

El concepto de curva de Dubins o camino de Dubins (en inglés, Dubins curve o Dubins path) se refiere a la curva de longitud mínima con una restricción en la curvatura y con tangentes y posiciones inicial y final prescritas, considerando que el vehículo que recorre la ruta solo puede ir hacia delante. Si el vehículo pudiera ir hacia atrás, estaríamos hablando de las curvas Reeds-Shepp, tema que no se tratará en este documento. En la Figura 2.1 se puede observar un ejemplo simple de una curva de Dubins. Más adelante, se explicarán los elementos que la componen.

Esta idea la demostró Lester Eli Dubins en 1957 utilizando el análisis matemático. En su artículo, mostró que el camino más corto en el plano entre dos puntos bajo las restricciones ya mencionadas se basa en una combinación de segmentos curvilíneos de curvatura máxima y/o segmentos rectos. Posteriormente, Harold H. Johnson en 1974 publicó un artículo donde describe las condiciones necesarias y suficientes para que una curva plana tenga longitud mínima bajo unas condiciones de curvatura continúa acotada por partes y puntos y direcciones iniciales y finales predefinidas. Más adelante, se volvieron a mostrar los mismos resultados utilizando otros métodos.

En el mundo de la robótica las curvas de Dubins son muy conocidas, ya que se utilizan por ejemplo para el movimiento de vehículos con ruedas, aeronaves de ala fija o vehículos acuáticos donde la maniobrabilidad de los mismos es limitada. En la navegación, ya sea un barco en la marítima o un avión en la aérea, es muy recurrente realizar maniobras en las cuales no se pueda girar directamente sino que se tiene que respetar la maniobrabilidad del vehículo. Esta situación difiere por ejemplo de la de un dron, ya que este tiene la capacidad de girar sobre sí mismo manteniendo la misma posición en el plano. A continuación, se van a mostrar una serie de ejemplos referentes a los tipos de vehículos que se han mencionado. Las imágenes que se muestran en esta sección han sido sacadas de un seminario sobre las curvas de Dubins.

Póngase de ejemplo un coche que pretende aparcar en un estacionamiento. Para dirigirse al lugar, el vehículo tiene que realizar un giro para orientarse en dirección a este, posteriormente debe avanzar de forma recta hasta un punto donde deba girar para alinearse con el aparcamiento. Esta sería la manera más corta de acceder desde su posición inicial al lugar de estacionamiento deseado como se ve en la Figura 6





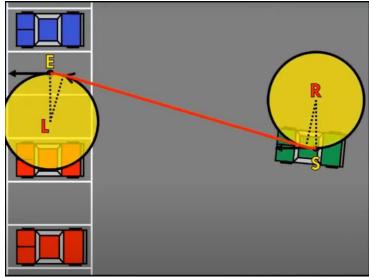


Figura 6: Curva de Dubins. Ejemplo del estacionamiento de un coche

Como último ejemplo podríamos optar por una aeronave, ya que es el objetivo en estas trayectorias. Para un avión de ala fija no es sencillo realizar maniobras de forma rápida, teniendo que recorrer grandes distancias para girar 180º por ejemplo. Es por ello que considerar las curvas de Dubins es de utilidad ya que te permiten respetar el radio mínimo de giro de la aeronave. Este radio puede venir dado por la resistencia de la estructura del avión, por la posibilidad de entrada en pérdida, o para realizar algún giro con una curvatura concreta. Obsérvese el ejemplo de la Figura 7.

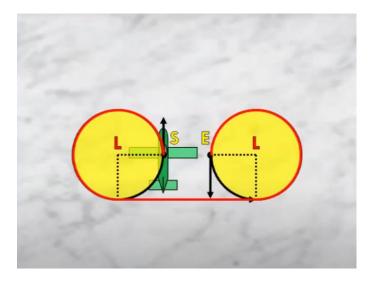


Figura 7: Curva de Dubins. Ejemplo de giro de 180º de un avión

Se observa en la imagen una curva de Dubins para ir desde el punto S (start) hasta el punto E (ending). Aunque esta curva de Dubins no parece el giro más intuitivo para dar la vuelta. Eso es porque esta curva no es la más corta de todas las posibles curvas de Dubins que pueden formarse. Una curva de Dubins se compone de un trozo curvilíneo, una sección recta y otra curva con radio mínimo; o también tres curvas consecutivas.





Por tanto, existen 6 tipos de curvas de Dubins: RSR, RSL, LSL, LSR, RLR, LRL; dónde R corresponde a una curva en sentido horario, S es un segmento recto y L es una curva en sentido antihorario. Es por ello que, para este caso del avión, sería más conveniente elegir otra opción en vez de una curva formada por un giro a izquierdas, un tramo recto y un giro a derechas. El camino más corto que podemos formar en este caso concreto correspondería a una curva a izquierdas, una curva a derechas y una última curva a izquierdas como se puede ver en la Figura 2.5.

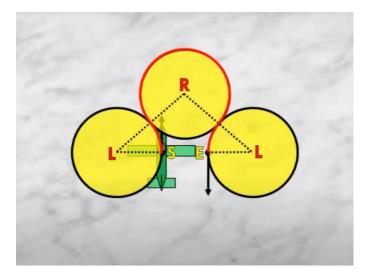


Figura 8: Curva de Dubins. Posbilidades en el giro de 180º de un avión

Como se ha mostrado, las curvas de Dubins son más usadas en el día a día de lo que se piensa. Es por ello que son un objeto de interés a la hora de planificar trayectorias. También se observa que hay varias curvas de Dubins para una misma situación, esto implica que no cualquier curva de Dubins va a ser la más corta. Por tanto, será conveniente realizar el cálculo de todas las posibilidades para ver cuál es la óptima. A continuación, se va enseñar el método de cálculo de estas rutas. Utilizando métodos geométricos y analíticos, se llega a la solución de una manera relativamente sencilla.

## B. Campo de visión (FoV)

El campo de visión de una persona es el rango que una persona puede ver a través de los ojos. Es decir, es donde se aprecian los objetos situados en el espacio. En las personas, el rango de visión ronda los 180° aunque el rango de visión efectivo o el lugar dónde las personas distinguen bien los elementos no es superior a los 30°.

Al campo de visión de forma general también se le conoce por su traducción al inglés, Field of View (FOV). Esta visión consta de dos componentes, el campo de visión horizontal y el campo de visión vertical formando ambas un rectángulo en su conjunto]. Al igual que las personas, existen sistemas como las cámaras que tienen su propio campo de visión.





Estos sistemas utilizan distintos objetivos según el uso que se les quiera dar. Por ejemplo, se necesitará un objetivo tipo gran angular para campos de visión grandes. Además, esto también suele perjudicar lo que se conoce como la resolución. Es lógico pensar que cuanto más grande es el campo de visión de un objeto, menor es la resolución del mismo, es decir, las pequeñas cosas que aparecen en la imagen serán menos precisas. Esta precisión de la cámara o de los sensores utilizados aporta las medidas más pequeñas que pueden representarse en un píxel. A lo largo del trabajo se tratará con parámetros mucho más generales que los mencionados aquí. De estos parámetros se hablará a continuación.

En misiones de vigilancia medioambiental, de búsqueda y rescate, o muchas otras de las que se habló cuando se mencionó el concepto de HAPS (High Altitude Pseudo Satellites), era sencillo obtener un amplio campo de visión debido a la gran altitud a la que vuelan estas aeronaves. Además, es interesante tener controlado el FOV para saber en todo momento las distancias que abarcan los sensores de estos vehículos no tripulados.

continuación se va a mostrar un esquema en la Figura 9 sobre el que se basará el campo de visión utilizado para realizar las trayectorias a lo largo de este proyecto.

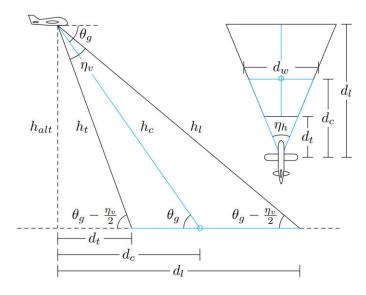


Figura 9: Campo de visión de un sensor instalado en la panza de una aeronave

#### C. Casos de uso

#### 1. Inspección de punto

En esta sección se va a hablar sobre el desarrollo del algoritmo correspondiente a la inspección de punto. Primero se introducirá los motivos de por qué se ha elegido este problema para posteriormente mostrar el código que lo resuelve. Además, se irán mostrando imágenes del proceso aunque los resultados finales y la simulación correspondiente se comentarán en secciones posteriores.

はおりまれるからあ





No se puede olvidar el enfoque que se le quiere dar al proyecto. Este enfoque está basado en que estas trayectorias tengan una futura aplicación en casos de interés. Es por ello, que uno de los objetivos es crear unas trayectorias que sirvan para casos de interés, o también se podrían denominar casos de uso, de ahí el título de la sección.

El caso de uso propuesto para este primer algoritmo corresponde a lo siguiente. Póngase el ejemplo de una persona o un colectivo que quiera tener una vigilancia de una extensión de tierra no muy grande, ya sea una planta solar, una serie de cultivos u otros ejemplos posibles. Esta extensión de tierra entraría por completo dentro del rango de visión de los sensores, es decir, que el campo de visión de los vehículos no tripulados sea mayor que la extensión de tierra a vigilar.

Además, los usuarios que pretenden mantener esta vigilancia quieren tener datos de la monitorización cada cierto tiempo, por ejemplo cada hora. Por último, necesitan esta monitorización durante una semana completa, situación bastante factible para los HAPS que gracias a la luz solar pueden mantenerse en vuelo durante días como ya se ha comentado en secciones anteriores.

Una vez decidido estos datos mencionados, cabe la posibilidad de que los vehículos no salgan todos desde el mismo estratopuerto (el término de estratopuerto se le da a las zonas de las que despegan y aterrizan vehículos destinados a volar en la estratosfera, como es el caso de los HAPS). Esta situación donde no despegan todos los UAVs desde el mismo sitio también se quiere contemplar. Por ello, habría que indicar los distintos puntos de despegue y aterrizaje que se van a utilizar.

Finalmente, hay que aportar los datos de la aeronave que se va a utilizar. Los parámetros necesarios para crear las trayectorias son la velocidad de la aeronave, considerando esta como una constante a lo largo del vuelo, y el radio mínimo de giro, que se utilizará en el cálculo de las trayectorias. Con todos estos datos, el algoritmo calcularía la ruta más corta que consiga respetar todas las especificaciones. Además, indicará al usuario cuantas aeronaves serán necesarias para cumplir los objetivos, desde dónde tendrán que despegar, en qué momentos tendrán que despegar y todos los puntos de las trayectorias a recorrer en formato 5D: un vector de tiempo, 3 vectores de posición (x, y, z) y el ángulo de guiñada de la aeronave. Este formato de salida será explicado más adelante.

Con el objetivo de que la aeronave volviera al mismo punto cada cierto intervalo de tiempo dado, se creó un punto auxiliar adicional, este se encontraría en las cercanías del punto de aproximación y haría que el HAPS tenga que pasar por él antes de llegar al punto de inspección. Funcionaría como una especie de desvío o de espera para cumplir la restricción del tiempo. Se va a mostrar una figura de como sería esa espera que hace el vehículo, aunque el código al respecto se mostrará en el desarrollo final del algoritmo. La solución adoptada para tal caso fue la de crear trayectorias en formas de hipódromo,





pudiendo así alargar o acortar la longitud del mismo en función de las restricciones aerodinámicas de la aeronave así como del tiempo impuesto de paso por el punto de interés. Estas trayectorias tipo pueden verse en la Figura 10.

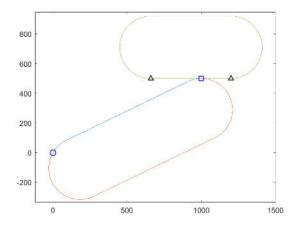


Figura 10: Inspección de punto con espera en hipódromo

### 2. Inspección de área

En esta sección se cambia la inspección de un punto concreto o una zona de tamaño reducido en el mapa, por un área de grandes dimensiones. Al igual que en la sección anterior, no hay que olvidar que estos casos de uso se han elegido porque tienen bastante aplicación en el ámbito de los UAVs o HAPS. Por ejemplo, se habló en la inspección del punto sobre la vigilancia de una zona pequeña como podría ser un campo de placas solares o un terreno agrario.

Otras posibles aplicaciones que pueden tener estas trayectorias serían por ejemplo una misión de búsqueda y rescate o ampliar las comunicaciones en una zona más aislada. Póngase el primer caso como ejemplo. Un caso muy frecuentado en España son los incendios forestales. Estos ocurren sobre largas extensiones de tierra como puede ser la zona de Castilla y León, Extremadura o Aragón.

Cuando se produce un incendio, cabe la posibilidad de que haya personas atrapadas en él o simplemente quiera observarse las dimensiones del mismo. Para ello, sería conveniente tener capacidad de monitorización de la zona y que las aeronaves puedan despegar desde distintos sitios, intentando elegir siempre el más cercano. Además, según el campo de visión de las aeronaves, estas tendrán que recorrer mayores distancias o menos. Por lo que también sería conveniente, distribuir toda la zona o área a revisar en distintas secciones las cuales sean vigiladas por distintos UAVs.

Todas estas ideas, serán aplicadas a lo largo del algoritmo de inspección de un área. A continuación, y tal como se hizo en la sección anterior, se mostrará una parte del proceso y de los objetivos que se fueron marcando. Estos objetivos moldearon y le dieron forma a la trayectoria final. Además, como pasó con la inspección de punto, se





impondrán una serie de constricciones que haya que respetar a la hora de realizar las rutas.

La inspección del área, se planteó cuando el caso de un punto concreto estaba ya bastante desarrollado. Esto facilitó la velocidad de funcionamiento, ya que ya se tenía bastante experiencia trabajando con las curvas de Dubins. El primero de los objetivos o de las intenciones que se tenían con esta inspección de área.

En esa misión, se comenzaba con un área circular que tenía que revisarse. Además, se disponía de un punto inicial desde el cual la aeronave despegaba. Una vez despegase, su propósito era acercarse a la zona por la parte más al Este en este caso y recorrer el círculo de inspección de Norte a Sur y viceversa alternando tramos rectilíneos. Para ello, las curvas de Dubins ayudaban bastante en la tarea, ya que el objetivo principal consistía en encontrar los waypoints de entrada y salida del área a inspeccionar. Los tramos paralelos se separaban entre sí, gracias al campo de visión de la aeronave. De esta manera, se aprovecha todo el Field of View posible, aunque existía un pequeño solapamiento entre pasadas controlado por un factor alpha. Todo esto se encuentra representado en la Figura 11.

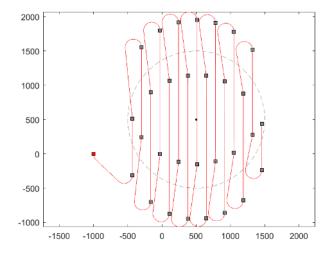


Figura 11: Ejemplo de búsqueda de área

El método utilizado para resolver este problema consiste en calcular los puntos de entrada al área y de salida de ella en una pasada de Norte a Sur o viceversa. El algoritmo incluye una posible rotación de la trayectoria en el caso de que al usuario le interese.

#### IV. Simulación

En este capítulo se harán varios ejemplos de los algoritmos presentados anteriormente. También se mostrará como se obtiene la simulación y que representa en la realidad. Por último, se utilizarán las trayectorias calculadas y las simulaciones para realizar una prueba de vuelo real.





#### 1. Ejemplo 1: inspección de punto con 1 HAPS

En este primer ejemplo se realizará un caso sencillo de un único UAV realizando una inspección de un punto no muy lejano.

Esta ruta la realiza una aeronave que va a una velocidad de 1 m/s y que utilizará un radio de giro de 0.5 metros. Además, despegará desde el punto [0,0] con dirección al Este, es decir, en la dirección positiva del eje x. Su objetivo, o punto de inspección, se encuentra situado en el [2,2] y se debe revisar en dirección Este también. El campo de visión se ha creado para que la aeronave pueda vigilar por delante y por detrás de la misma. Tiene dimensiones de un rectángulo de 0.5 metros de ancho y 0.6 metros de largo. Por último, cabe destacar que el tiempo total de vuelo y el tiempo por vuelta tienen el mismo valor para asegurar de que solo realice una vuelta al circuito.

La Figura 12 y la Figura 13 muestra los mensajes emergentes de la ventana de comandos y una imagen de la ruta creada tras responder estos mensajes.

```
The Point Inspect Task will be performed Minimum task time in seconds is 4.330000 Would you like to keep on with the run? (Yes = 1 \mid No = 0) 1 You need 1 HAPS to achive the time constraint UAV is going to do 1 laps
```

Figura 12: Mensaje emergente

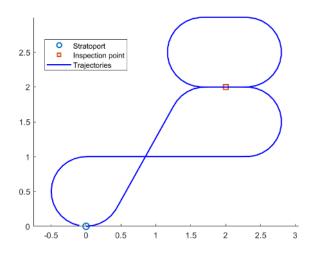


Figura 13: Resultado simulación ejemplo 1

En los mensaje se puede observar que se indica cual de los dos métodos de inspección se va a utilizar, que en este caso es la inspección del punto. Además, se indica en la ventana de comandos cual es el tiempo mínimo que puede tardar la aeronave con las características introducidas en dar una vuelta. Se puede comprobar que el tiempo por vuelta que se ha indicado es superior al tiempo mínimo y, por tanto, solo se necesitará un único HAPS o UAV como está indicado en el texto posterior. Además se confirma que solo se dará una vuelta ya que los tiempos de vuelta y totales coinciden en este caso.





En la imagen de la derecha se observa la ruta completa representada con una línea azul. Comienza en el estratopuerto situado en el origen representado por un círculo azul. El punto de inspección o punto objetivo se muestra como un cuadrado rojo. Todos estos datos pueden ser verificados en la leyenda.

#### 2. Ejemplo 2: inspección de punto con varios HAPS

En este tercer ejemplo se va a mostrar una flota de tres UAVs saliendo desde estratopuertos distintos. Al igual que en el ejemplo anterior, esta flota mantendrá una distancia de seguridad entre ellos gracias a las esperas iniciales que realizan. Las tres ubicaciones de los estratopuertos serán aportadas en los datos iniciales, de esta manera se evitan diálogos adicionales. También cabe destacar que se pondrá un tiempo de vuelo bastante superior al resto de tiempos para comprobar que el algoritmo funciona correctamente independientemente del número de vueltas. A diferencia del ejemplo anterior, en este se han añadido dos estratopuertos adicionales ya que se pretende usar una flota de tres HAPS saliendo de diferentes localizaciones. El resultado obtenido se muestra en la Figura 14.

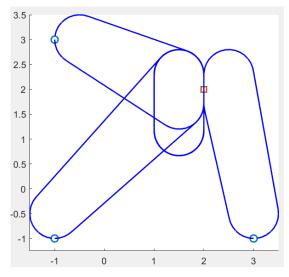


Figura 14: Resultado simulación ejemplo 2

#### 3. Ejemplo 3: inspección de área con 1 HAPS

Este primer ejemplo de la inspección de área será el más sencillo. En el se mostrará una única aeronave sobrevolando un área rectangular de dimensiones dadas. El UAV únicamente realizará una inspección y volverá al estratopuerto del que despegó.

El campo de visión en este caso será un rectángulo formado por 1 metro de ancho y 0.6 metros de largo. En este método de inspección se hará uso también del factor de solapamiento alpha. Como su propio nombre indica, este parámetro permitirá controlar cuanto porcentaje del campo de visión revisará zonas ya visitadas. La altitud de las aeronaves será constante a lo largo de todas las trayectorias y con valor de 1 metro.





La zona de inspección en este caso será un rectángulo con dimensiones de 6×5.4 metros, donde los extremos se encontrarán a las siguientes distancias del origen de coordenadas: el Norte estará a 2 metros del origen, el Sur se encontrará a 2.5 metros del eje x en dirección hacia abajo, el este y el oeste se encuentran ambos a 3 metros del eje y en direcciones contrarias. El tiempo total de vuelo se ha indicado a 40 segundos teniendo en cuenta como se verá en las siguientes imágenes que el tiempo que tarda la aeronave en dar una vuelta es de aproximadamente 39 segundos. En esta inspección de un área, el dato correspondiente a la frecuencia de inspección no se aplica.

En la Figura 15 se muestra la trayectoria obtenida.

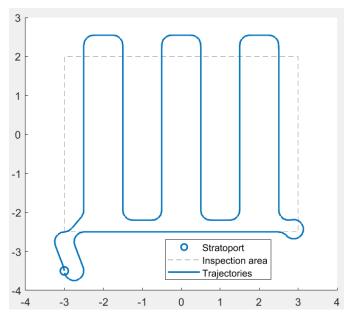


Figura 15: Resultado de simulación ejemplo 3

## 4. Ejemplo 4: inspección de área con varios HAPS

Por último, se va a presentar un ejemplo que supera en complejidad a los anteriores. En este último ejemplo se va a ver el potencial que tiene el algoritmo para organizar una flota de vehículos mucho más grande que en los anteriores ejemplos. En este caso se van a incluir unas especificaciones que necesiten de una flota de 12 vehículos para cumplirse.

Para llevar a cabo esta simulación se añadieron hasta 6 estartopuertos con diferentes localizaciones, forzando al algoritmo a elegir qué estratopuerto conviene más para cada una de las zonas a revisar. El algoritmo divide el área de forma automática en 12 partes, cada una inspeccionada por una HAPS. El resultado de la simulación puede verse en la Figura 16









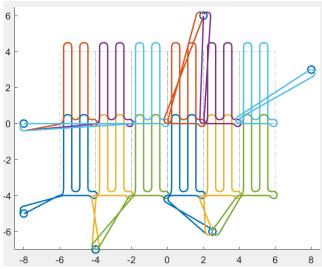


Figura 16: Resultado simulación ejemplo 4

## V. Prueba de concepto en Testbed

En esta sección, se va a realizar una demostración donde una flota de vehículos no tripulados recorra alguna de las trayectorias que se han presentado en ejemplos anteriores o similares. Primero se van a comentar las posibles aplicaciones reales que pueden tener las trayectorias y se hará una breve explicación del entorno donde se van a probar las trayectorias simuladas. Posteriormente se realizarán tres casos distintos donde se mostrará la trayectoria, se realizará la simulación correspondiente y se probarán en un entorno realista.

La planificación de trayectorias es un recurso con mucho futuro en el sector agrario que poco a poco se va digitalizando más y más. Además, otros muchos sectores se desarrollarían más haciendo uso de drones que optimicen las inspecciones de sus equipos de trabajo como podría ser una planta de placas solares. Es por ello que a estas trayectorias que se han planteado en este trabajo se les ha buscado una aplicación. También es importante que partiendo de las trayectorias creadas, se pueda realizar una simulación donde se compruebe el comportamiento que tendrá la flota de vehículos que recorrerán estas rutas. Por tanto, se va a utilizar un ejemplo con aplicación real para demostrar la aplicabilidad del algoritmo creado.

El ejemplo que se va a tratar se basará en una misión de vigilancia a través de distintos territorios de la comunidad autónoma de Andalucía. Esta misión se dividirá en tres casos de uso distintos. En el primero de los casos se realizará una inspección de un punto situado en los alrededores de la provincia de Córdoba. Para el siguiente de los casos de uso se pretende realizar una misión de inspección sobre todo el territorio de Andalucía utilizando tan solo 3 aeronaves. Por último, en el tercer ejemplo se realizará la misma inspección que se hizo en el segundo pero se podrán utilizar más aeronaves hasta un total de 6 vehículos en la flota.





Para probar estas misiones primero habrá que crear las trayectorias que resuelvan el problema de la forma más eficiente. Posteriormente, se hará una simulación para comprobar que las trayectorias cumplen con lo esperado y observar como recorren las trayectorias, como realizan los despegues y como respetan las distancias entre las aeronaves. Finalmente, se terminará el caso probando las trayectorias en una prueba real y comparando los resultados obtenidos con la simulación. Los algoritmos que realizarán estas trayectorias y las simulaciones correspondientes ya han sido explicados a lo largo del trabajo. Es por ello que a continuación se explicará únicamente el entorno real donde se va a trabajar.

Para realizar estas pruebas se ha hecho uso de un espacio, Figura 17, perteneciente a la empresa CATEC (Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales) dónde se pueden realizar pruebas como la cooperación y coordinación de flotas de vehículos.



Figura 17: Testbed del CATEC

Este banco de pruebas dispone de 20 cámaras VICON que forman un sistema de posicionamiento en interiores. Este sistema obtiene la posición y la actitud de los objetos que se encuentre en un volumen de 15x15x5 metros.

Este es el motivo por el que las trayectorias creadas en los ejemplos mostrados en secciones anteriores utilizaban rangos menores a 10 metros de distancia y a unas velocidades bajas, ya que se pretendían realizar pruebas sobre el banco de pruebas mencionado.

Para dichos ensayos se usaron unos UAVs comerciales denominados *Crazyflies*. Este concepto corresponde con un pequeño dron de cuatro motores que cabe en la palma de la mano, Figura 18. Este dron es muy utilizado para realizar pruebas sobre algoritmos en desarrollo, ya que por su pequeño tamaño, su peso tan ligero de tan solo 27 gramos y las velocidad bajas a las que se usan, proporcionan mucha seguridad en los casos en los que alguna parte de los algoritmos en desarrollo fallen. Además, este dron es muy resistente a los golpes y las colisiones a las que pueden ser sometidos en estas pruebas.









Figura 18: Crazyfly

Estos drones se utilizarán como una flota para realizar las pruebas del sistema desarrollado.

## A. Primera aplicación: inspección de punto

En esta primera aplicación se va a realizar una inspección sobre una zona que se encuentra al Norte de la ciudad de Córdoba. Esta inspección se realizará con una flota de tres aeronaves que mantengan una distancia de seguridad entre ellos. Esta distancia también permite que se realice la inspección respetando el tiempo que se quiere mantener entre inspección e inspección.

Para crear el entorno se ha importado una imagen del mapa de Andalucía. Ha sido necesario modificar la posición de la imagen para que se encuentre adecuadamente orientada a la hora de hacer una figura con ella en MATLAB. Además, se observará en las siguientes imágenes que las trayectorias realizadas están giradas respecto los ejemplos mostrados en la sección anterior. Esto es debido al entorno donde se realizarán las pruebas que tiene su propio sistema de coordenadas y se han adaptado las trayectorias al mismo. Todo esto se irá comentando a lo largo de la sección.







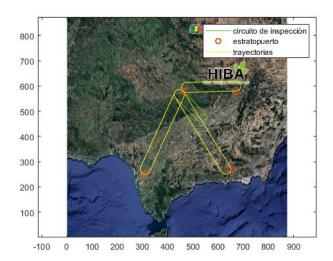


Figura 19: Trayectoria de la aplicación 1

En la Figura 19 se observa el mapa de Andalucía donde se han situado tres estratopuertos distintos bastante distanciados unos de otros. El punto de inspección queda marcado con un cuadrado naranja al Norte de Córdoba en el centro de la imagen. Las rutas que se encuentran representadas en amarillo son las trayectorias que irán recorriendo las aeronaves. Por otro lado, el circuito representado en color verde muestra la trayectoria de inspección que realizara la flota de vehículos no tripulados.

La última fase de esta aplicación sería probar las trayectorias en una flota de drones reales para verificar que la simulación realizada corresponde con los resultados que se obtendrían en una aplicación real. Para ello se han elegido los drones crazyflies en el banco de pruebas del que se ha hablado en la introducción de esta sección. Gracias a estos dos se han podido probar las trayectorias que se han creado y se ha comprobado que la simulación funciona de forma satisfactoria.

A continuación, se van a mostrar tres imágenes, en la Figura 20, las cuales corresponden a distintos momentos a lo largo de la prueba real que se grabó en vídeo.

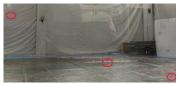






Figura 20: a la izquierda, el despegue; al centro; la inspección; a la derecha, el regreso y aterrizaje

Estas tres imágenes muestras momentos cercanos a los representados en la simulación. En la primera imagen la aeronave que se encuentra en la parte superior izquierda es la primera en despegar mientras que las otras están esperando que que llegue su momento para despegar y aproximarse al circuito de inspección. Cabe destacar que como se dijo en los apartados que comentaban las simulaciones, las trayectorias se han





creado en base a estas pruebas en las que las aeronaves despegan verticalmente ponderando su posición en cada instante. Una vez terminado el aterrizaje, se puede comprobar que el tiempo transcurrido es el mismo que se indicaba en los resultados de la simulación.

En la segunda imagen la flota ya se encuentra realizando la inspección manteniendo la distancia de seguridad correspondiente. En este circuito se realizan 4 vueltas como estaba indicado antes de regresar a los puntos desde los que despegaron. En ningún momento de la prueba los vehículos se salen de la ruta indicada. Finalmente, una vez realizada las vueltas de inspección, proceden a regresar por las rutas específicas para cada UAV a los puntos desde los que despegaron. En la tercera imagen se observa ese momento en el que el primer UAV está aterrizando (a la izquierda de la imagen) y los otros dos están aproximándose a sus estratopuertos correspondientes.

Una vez finalizada esta prueba se verifica que los resultados obtenidos en el entorno real corresponden con los que se obtuvieron en la simulación y respetan las trayectorias creadas con el algoritmo correspondiente.

## B. Segunda aplicación: inspección de área 3 UAVs

En este segundo ejemplo de posibles aplicaciones de las trayectorias se va presentar una serie de rutas para tres UAVs distintos. Estas aeronaves se encargarán de realizar una inspección de toda la superficie de Andalucía. Para conseguir este propósito aprovecharán que disponen de un gran campo de visión que les permite monitorizar gran parte de Andalucía en pocas pasadas. Para disminuir el tiempo total se han introducido un total de 3 vehículos en la flota. Estos vehículos recorrerán Andalucía en dirección de Este a Oeste y viceversa. Además, una vez creadas las trayectorias se realizará una simulación de las mismas con el algoritmo diseñado y por último una demostración real de como se comportarían las aeronaves.

Primero se va a mostrar en la Figura 21 las distintas rutas que recorrerá cada aeronave.









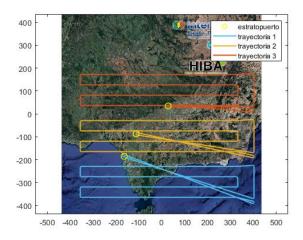


Figura 21: Trayectorias de la aplicación 2

En esta imagen se pueden ver tres rutas diferentes cada una recorrida por un único UAV. La primera ruta, representada de color azul, comienza en las proximidades de la ciudad de Cádiz. La aeronave que se encarga de realizar esta ruta, monitoriza la mayor parte del sur de Andalucía comenzando en zonas del mar Mediterráneo. La siguiente sección corresponde con la ruta coloreada de amarillo. En esta, la aeronave realiza su despegue en las proximidades de la ciudad de Sevilla y se encarga de recorrer, monitorizar e inspeccionar la zona más central de Andalucía. Por último, la ruta en naranja comienza en las proximidades de Córdoba y revisa la parte superior de la comunidad autónoma andaluza.

Para realizar esta misión se podrían utilizar aeronaves tipo HAPS de las que se habló en la introducción de este trabajo. Estas podrían estar días, incluso meses, sobrevolando Andalucía. Con ello se podría obtener una monitorización de la misma y prevenir incendios o realizar misiones para llevar cobertura a sitios más remotos del territorio.

Esta prueba se realizó con éxito de nuevo en el testbed de las instalaciones de CATEC.

#### C. Tercera aplicación: inspección de área 6 UAVs

En la última de las aplicaciones la situación se va a complicar un poco más. Ya que en el ejemplo anterior se tardaba mucho en monitorizar el territorio completo, se pensó en realizar un ejemplo doblando el número de vehículos no tripulados utilizados en la flota. De esta manera se podría disminuir bastante el tiempo total de la inspección y permitiría dar más vueltas al circuito. La nueva trayectoria que el algoritmo ha creado es la que se muestra en la Figura 22.









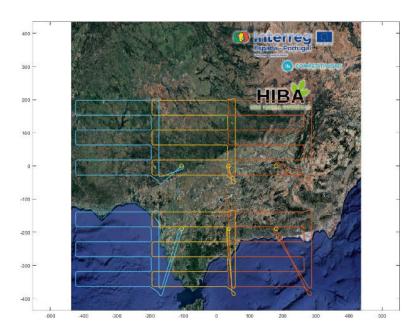


Figura 22: Trayectorias de la aplicación 3

Como se ha mencionado antes, en esta aplicación práctica se va a disminuir el tiempo de inspección respecto al obtenido en el segundo ejemplo. Esto se consigue introduciendo tres aeronaves más y que cada aeronave realice una inspección dividiendo el territorio de Andalucía en 6 partes diferentes.

Se observa en la imagen de que previamente la distancia desde el punto más al Oeste de Andalucía hasta el punto más al Este era muy grande. Es por ello que se ha decidido reorganizar para que esa distancia se divida en 3 partes. Por otro lado la distancia desde el extremo Norte hasta el extremo Sur no es tan grande, solo se dividirá en dos para introducir de esta manera la flota de 6 vehículos no tripulados.

En la Figura 23 se observa la disposición de los crazyfly previo al vuelo.



Figura 23: disposición de los crazyfly en la aplicación 3





En la siguiente figura, Figura 24 se observa el escenario real realizado y como los UAVs realizan un vuelo coordinado barriendo el área prevista.



Figura 24: vuelo en formación de 6 UAVs

## VI. Conclusiones

Como ha podido verse a lo largo del documento, se ha desarrollado un sistema de gestión de flora para una hipotética flota de HAPS, demostrándose así la viabilidad de este tipo de sistemas para la monitorización de tanto pequeñas como grandes extensiones de cultivos. Este sistema no solo se ha demostrado en simulación, si no que se ha podido testear a escala en un testbed de interiores, demostrando así a su vez la versatilidad del sistema dado que inicialmente esta diseñado para aeronaves de ala fija y finalmente se probó con pequeños multirrotores, no resultando esto en un detrimento de la eficiencia o viabilidad del desarrollo.

Este informe, junto con el entregable E9 – Datos de simulación de plataformas HAPS, demuestra la viabilidad de estos sistemas para aplicaciones de agricultura en el futuro despliegue de estos en la estratosfera.

Ahora bien, el camino hasta llegar no será inmediato. Hay varias barreras tecnológicas que suplir, entre las que cabe destacar:

- Capacidad de carga de pago
- Teleoperatividad de las aeronaves
- Ciberseguridad en la transmisión de datos
- Sistemas de gestión del tráfico aéreo en la estratosfera







Fondo Europeo de Desarrollo Region.



• Infraestructura en tierra para el soporte de las operaciones de HAPS.

A parte de esto, cabe añadir el reto legislativo que estas aeronaves representan, ya que, primero, para llegar a la estratosfera deberá cruzar el espacio aéreo tripulado además del U-space reservado para el espacio aéreo de muy bajo nivel. Una vez a 20km de altura, se espera que compartan espacio aéreo con otro tipo de aeronavez como pueden ser los viajes espaciales o vuelos supersónicos.

Por tanto, esta tecnología es prometedora para aplicaciones como la agricultura, pero representa un reto tecnológico y legislativo que deberá de desarrollarse en los próximos años.