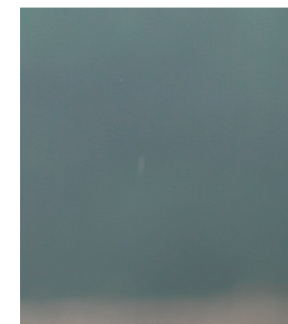
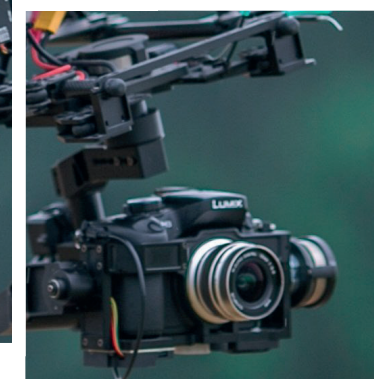
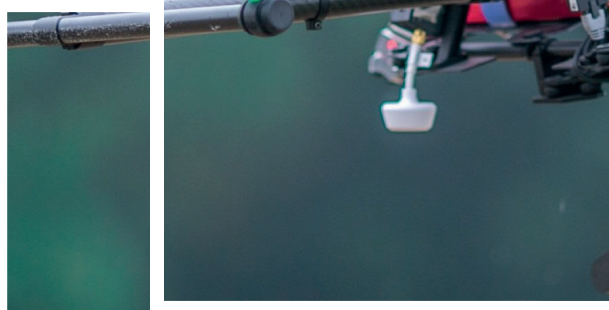
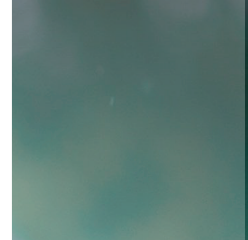
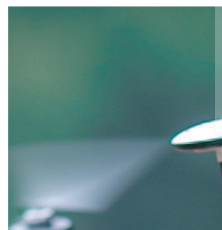
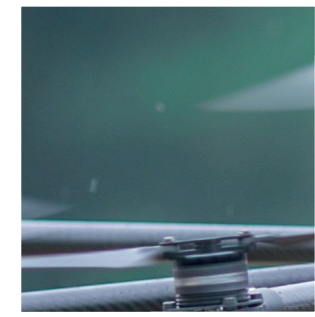


SERIE DE CUADERNOS TECNOLÓGICOS

Cuadernos de Isdefe



3

SISTEMAS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAS) CIVILES



Isdefe

Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS) Civiles

Volumen 3

Serie Cuadernos Tecnológicos

Cuadernos de Isdefe



AUTORES

Jaime Torrecilla Puebla

María Anta García

Susana Durán Vizueté

Fco. Germán González Antequera

Esther Nistal Cabañas

Javier Rosano de Lucas

Pedro José García Moreno

Carolina Goy Naranjo

Olga Clara Aranda García

Raul García González

Carlos Hugo Prieto Pedrosa

Enrique Contreras Alonso

César Ruiz Hurtado

M^a Eugenia Pérez de Mata

María Saíz Coronado

Laura Parga Gata



Titulo original: Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS) Civiles

© Isdefe

C/ Beatriz de Bobadilla, 3. 28040 Madrid

www.isdefe.es

Primera edición: Septiembre 2025

ISBN: 978-84-09-74969-0

No comercial

Depósito legal: M-16512-2025

Editorial: Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España SA SME MP

Coordinador: Juan Manuel Garcia Montaña

Coordinador Técnico: Jaime Torrecilla Puebla

Equipo de edición y revisión de estilo: Juan Manuel Garcia Montaña, Jaime Torrecilla Puebla, Ticiano Ciudad Mora.

Diseño y maquetación: David Sánchez Martín

Grabación y edición de vídeos: Favorit Comunicaciones www.favoritcom.es

Impreso por Byprint Madrid

Impreso en España Printed in Spain

Las opiniones contenidas en este libro son de exclusiva responsabilidad de los autores firmantes. No pretenden reflejar las opiniones ni el punto de vista de Isdefe.

El equipo de edición ha hecho todos los esfuerzos posibles para obtener los permisos pertinentes del material reproducido en este libro. Si se hubiera producido alguna omisión, agradeceríamos que nos remitan la correspondiente solicitud para subsanar el error.

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial sin autorización del editor ©.

Queremos mostrar nuestro más sincero agradecimiento a Dña. Montserrat Mestres Domènech, Directora de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) y a todo su equipo, por las valiosas aportaciones al resultado final de este cuaderno.



Aerotaxi eHang 216 sobrevolando la ciudad de Benidorm el 27 de febrero de 2025 [Cortesía del Ayuntamiento de Benidorm]

‘De vez en cuando, una nueva tecnología, un antiguo problema y una gran idea se convierten en una innovación’.

Dean Kamen. Creador del Segway.



Dron DJI S1000 con cámara montada sobre estabilizador cardan [Cortesía de Laurent Schmidt. Pixabay].

PRÓLOGO



Dña. Monserrat Mestres Domènech ***Directora de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA)***

Vivimos un momento de gran relevancia para la aviación civil marcado por una transformación profunda que afecta, no solo a la tecnología y a los modelos de operación, sino también a la forma en que concebimos el uso

del espacio aéreo. En este contexto, el crecimiento exponencial del uso de drones o sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) plantea nuevos retos y oportunidades para todos los actores del sector.

La publicación de este Cuaderno de Drones Civiles llega en un momento especialmente oportuno. La creciente presencia de UAS en múltiples ámbitos —desde la logística y la agricultura hasta la inspección de infraestructuras o la seguridad— exige una respuesta rigurosa y estructurada por parte de los reguladores, la industria y la sociedad. Este cuaderno nace con vocación de convertirse en una referencia para comprender las claves de este ecosistema en evolución, aportando una mirada técnica, operativa y estratégica.

Como autoridad aeronáutica, nuestro compromiso con la seguridad operacional es prioritario. Esta premisa guía cada una de nuestras decisiones y cobra especial relevancia en un entorno complejo como el de los UAS, donde la innovación debe ir acompañada de un marco regulador sólido y alineado con los estándares internacionales. La Unión Europea ha consolidado su compromiso en esta materia a través de una serie de Reglamentos, reforzados por disposiciones nacionales que estructuran el entorno normativo del sector.

La evolución de los UAS no representa únicamente un avance tecnológico: supone un cambio de paradigma en la forma en que gestionamos nuestro espacio aéreo. En este nuevo modelo de movilidad aérea —Urban Air Mobility (UAM) y Advanced Air Mobility (AAM)— es fundamental que la integración de los UAS en el espacio compartido con aeronaves tripuladas se lleve a cabo con garantías de seguridad, eficiencia y respeto al interés general.

Por ello, resulta esencial adoptar un enfoque sistémico que combine innovación tecnológica, marcos regulatorios claros y una colaboración efectiva entre todos los agentes del ecosistema:

proveedores de servicios de navegación aérea, operadores de drones, autoridades locales, industria tecnológica, fuerzas de seguridad, y la ciudadanía. Un desarrollo profundo de los UAS no será posible sin el respaldo claro de la sociedad. Tanto reguladores como supervisores, tenemos la responsabilidad de generar y salvaguardar la confianza pública necesaria para hacerlo viable.

Nos encontramos en un momento especialmente propicio para abordar esta reflexión colectiva sobre el futuro de la aviación no tripulada. La madurez tecnológica de los UAS, el auge de las soluciones de movilidad sostenible, la creciente conciencia medioambiental y el interés de la ciudadanía por nuevos modelos de transporte hacen que la sociedad esté hoy más preparada que nunca para dialogar sobre el papel de los drones en nuestras vidas. A su vez, el ecosistema normativo europeo y nacional ha avanzado significativamente, ofreciendo un marco sólido que proporciona seguridad jurídica y promueve la innovación.

En este contexto, la publicación de este Cuaderno de Drones Civiles no solo es oportuna, sino necesaria. Su enfoque técnico y divulgativo lo convierte en una herramienta esencial para quienes operan, regulan, diseñan o estudian el uso de UAS en el entorno civil. Esta obra está llamada a convertirse en una referencia dentro del sector, al ofrecer una visión integral y actualizada de los aspectos clave que configuran el presente y el futuro de la aviación no tripulada. Un documento que no solo informa, sino que inspira, y que contribuye decididamente a construir una aviación más conectada con las necesidades del siglo XXI.

En el cuaderno se abordan temas como la gestión del tráfico aéreo, que en los nuevos escenarios exige también una evolución en las herramientas utilizadas. Conceptos como el U-Space europeo o el UTM estadounidense son respuesta a esa realidad.

Este proceso de transformación afecta asimismo al diseño urbano y a la ordenación del territorio. La implementación efectiva de la UAM exige planificar desde el inicio la integración de vertipuertos en los planes de movilidad urbana sostenible, involucrando a las autoridades locales y fomentando pruebas reales que permitan a la ciudadanía familiarizarse con estos nuevos servicios. Solo así garantizaremos una implantación armónica, justa y aceptada.

Otro aspecto clave será el papel de los proveedores USSP (U-Space Service Providers), cuya participación añade una capa de complejidad en la gestión del espacio aéreo. La convivencia entre múltiples actores —operadores, proveedores de servicios, usuarios finales y autoridades de supervisión, — exigirá una gobernanza clara, mecanismos de interoperabilidad y estándares tecnológicos comunes.

Tampoco podemos olvidar el desarrollo de tecnologías clave para la seguridad, como los sistemas de Detección y Evitación (DAA), las comunicaciones mando-control seguras, los sistemas de navegación redundantes o la vigilancia cooperativa. Estas capacidades serán imprescindibles para garantizar la seguridad de las operaciones, especialmente en entornos urbanos densos y a baja cota.

El Cuaderno de Isdefe introduce también con acierto un ámbito emergente que está ganando cada vez mayor protagonismo: las plataformas de gran altitud o HAPS. Su potencial para ofrecer conectividad, vigilancia ambiental o cobertura en emergencias es enorme, y se prevé que su mercado crezca significativamente en la próxima década. Mientras que los HAPS ofrecen la capacidad de operar durante períodos más largos que los UAS, son también una solución más económica que los satélites, lo que les confiere una ventaja competitiva significativa.

No obstante, para que estos sistemas puedan operar con garantías será necesario acelerar el desarrollo de marcos normativos específicos y establecer una base reguladora clara que permita su integración segura en el espacio aéreo, sin ignorar las cuestiones medioambientales derivadas de sus operaciones.

En definitiva, estamos ante un cambio de era en la aviación. La oportunidad es enorme, así como también lo son los desafíos. Desde AESA seguiremos trabajando para que esta transformación se produzca de forma segura, ordenada y en beneficio de toda la sociedad. Y lo haremos, como siempre, desde la colaboración, el rigor y la vocación de servicio público que nos caracteriza.

Creo verdaderamente que este Cuaderno representa un valioso instrumento para avanzar en esa transformación. Por ello, quiero felicitar a Isdefe por la excelente iniciativa y la brillante ejecución, y confío en que se convierta en una obra de referencia para todos los profesionales, responsables institucionales y ciudadanos interesados en comprender y participar en el futuro de la aviación no tripulada.





Dron DJI T30 en tareas de fumigación [cortesía de DELSAT International Drones].



Entrega de un paquete a domicilio por un dron de la compañía Wing [Fuente: <https://www.wing.com>].

SISTEMAS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAS) CIVILES

PRÓLOGO

Introducción histórica a los UAS civiles

<i>¿Qué es un dron?</i>	17
<i>Evolución histórica</i>	17
<i>Evolución terminológica</i>	24

1. Sistemas Aéreos No-Tripulados (UAS)

<i>Configuraciones</i>	30
<i>Sistemas de Propulsión y Energía</i>	33
<i>Prestaciones</i>	38
<i>Sistemas de Comunicaciones, Mando y Control (C3)</i>	39
<i>Sistema de Navegación</i>	43
<i>Sistema de Vigilancia</i>	45
<i>Carga de Pago</i>	49
<i>Situación de los UAS en España</i>	52

2. Aplicaciones

<i>Ventajas del uso de UAS</i>	60
<i>Retos para el uso de UAS</i>	60
<i>Principales aplicaciones</i>	60

3. Escenarios de Operación

<i>Contexto normativo europeo y nacional de los UAS civiles</i>	80
<i>Clasificación de las operaciones de UAS civiles</i>	81
<i>La incorporación de los UAS civiles en el espacio aéreo</i>	84
<i>Servicios a operadores civiles</i>	89
<i>Reglas de vuelo (IFR/VFR/DFR)</i>	93
<i>Nuevo escenario urbano para los UAS: Vertipuertos</i>	95

4. Sistemas Anti-Dron

<i>Definición de la amenaza: caracterización y análisis de riesgos</i>	106
<i>Sistemas y capacidad C-UAS: Tecnologías anti-dron</i>	107
<i>Procedimientos de respuesta en los aeropuertos</i>	114
<i>Soluciones tecnológicas</i>	118
<i>Desarrollos tecnológicos de empresas españolas</i>	119

5. Movilidad Urbana/Regional Aérea

<i>Concepto de operación de la UAM</i>	126
<i>Aplicaciones (Aerotaxis, Servicios de paquetería)</i>	134
<i>Aeronaves VTOL</i>	137
<i>Vertipuertos</i>	140
<i>Viabilidad de la UAM</i>	142



Prototipo Helios de AeroVironment Inc desarrollado a partir de los prototipos Pathfinder y Centuri3n de la NASA [Fuente NASA].

6. HAPS

Introducción

Aeronaves HAPS

Condiciones atmosféricas de las HAO

Conceptos de Operación

Estratopuertos

Marco legal

Aplicaciones

AUTORES

ACRÓNIMOS

149

150

151

156

157

163

165

168

181

175

NOTA EDITORIAL

Este cuaderno ofrece una introducción general al estado del arte de los drones civiles en el momento de su elaboración. Dado que la tecnología de los drones y sus aplicaciones están en constante y rápida evolución, es posible que algunos de sus contenidos se hayan quedado obsoletos con el desarrollo de nuevas tecnologías y la implantación de regulaciones que modifiquen el panorama actual. Por todo ello, recomendamos al lector consultar fuentes actualizadas para obtener la información más reciente y relevante en este campo.

Para la elaboración de este cuaderno se ha utilizado el apoyo de la inteligencia artificial, siempre bajo una exhaustiva supervisión de los autores, lo que ha permitido una recopilación y análisis más eficientes de la información disponible.



Hermanos Good demostrando en 1937 el primer vuelo por control remoto de un aeromodelo [Fuente: Ted Just National Model Aviation Museum]

Introducción histórica a los UAS civiles

Susana Durán Vizuite
Olga C. Aranda García
Raul García González
María Saíz Coronado
Laura Parga Gata

¿QUÉ ES UN DRON?

La terminología usada en la literatura y en la normativa relativa a los drones es muy variada y ha ido cambiando a lo largo de los años. Por ello, es importante comenzar este Cuaderno anticipando muy brevemente las definiciones/acrónimos que utilizan los principales organismos que regulan esta materia.

Un **dron** es una aeronave cuya característica principal, que la hace diferente de la aviación tradicional, es que el piloto no está a bordo. Esta aeronave incluso podría volar de forma autónoma, este es el caso en que el piloto no interviene en el vuelo; ocurre, por ejemplo, cuando un dron realiza una operación previamente programada.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) define **“Aeronave pilotada a distancia” (RPA)** como aquella aeronave que es pilotada desde una estación de pilotaje a distancia¹. La Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), por su parte, utiliza en su normativa el término **“Sistema de aeronave no tripulada” (UAS)**, que comprende la aeronave no tripulada y el equipo para controlarla de forma remota².

Más adelante en este capítulo se aclarará con más detalle la diferencia entre las diversas terminologías que se utilizan.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Que el desarrollo de la aviación civil y militar ha avanzado de manera inseparable a lo largo de la historia es un hecho

1. Anexo 2 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional – Reglamento del aire.
2. REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2019/947 de la comisión de 24 de mayo de 2019 relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas.

ampliamente reconocido. Sin embargo, a menudo pasa desapercibido el papel fundamental que la aviación no tripulada ha tenido desde sus inicios, tanto para impulsar la aeronáutica tradicional, como para asumir un papel cada vez más importante por sí sola.

Prueba de este papel es que los pioneros de la aeronáutica utilizaron modelos a escala no tripulados para probar y perfeccionar sus diseños basados en principios físicos novedosos. Esta evolución se aceleró en el contexto de los conflictos bélicos del siglo XX, donde la aviación no tripulada desempeñó un papel crucial.

Los precursores: Siglos XVIII y XIX

Remontándonos un poco más atrás, el verdadero precursor de la aeronáutica moderna fue el desarrollo de los globos aerostáticos, a principios del siglo XVIII. En 1783, los hermanos Montgolfier, Jacques-Étienne y Joseph-Michel, hicieron volar el primer globo aerostático no tripulado en el Campo de Marte de París. Este globo, aunque en vuelo autónomo, no seguía una trayectoria controlada. Posteriormente, en 1849, se usaron globos de vuelo libre de 7 m de diámetro durante el asedio de Venecia en la Guerra de Independencia de Italia. Estos globos arrastraban un cable de cobre que permitía lanzar una bomba sobre un objetivo.

No es hasta finales del siglo XIX cuando Louis Brennan demuestra la posibilidad de controlar remotamente un objeto: en 1888 dirigió un torpedo desde una embarcación a través del río Meadway (Inglaterra) guiándolo con precisión, con la única ayuda de un cable, en una navegación que tuvo un alcance de unos 1.800 metros.

Siguiendo en esta línea, y retornando a la aeronáutica, Samuel P. Langley desarrolló una serie de aeronaves a vapor no pilotadas de unos 11 kg, que probaba lanzándolas con una catapulta. En mayo de 1896 consiguió que al menos en dos de los ensayos se mantuvieran en vuelo sobre el río Potomac (Estados Unidos) a lo largo de unos 1.000 m y con una velocidad de hasta 40 km/h, llegando a registrar un vuelo de 1 minuto y 45 segundos. Fueron los primeros vuelos con éxito de una aeronave más pesada que el aire con un motor completo de tamaño considerable y los protagonizaron unas aeronaves no tripuladas.

Primera mitad del Siglo XX, las grandes guerras

En esos inicios de la aviación, y de la aviación no tripulada en particular, los conceptos de estabilización automática, control remoto y navegación autónoma eran incipientes; sin embargo, las primeras soluciones no tardaron en llegar de

mano de los intereses e inversión militares de las primeras décadas del siglo XX.

René Lorin desarrolló una bomba voladora propulsada a reacción, ya en 1908, similar al futuro V-1 alemán usado durante la Segunda Guerra Mundial, que podía controlarse de manera remota mediante señales de radio.

No obstante, se considera a Nikola Tesla el creador del misil de crucero y de la aviación no tripulada. Ya en 1898 patentó el "Method of and Apparatus for Controlling Mechanism of Moving Vessels or Vehicles": el primer dispositivo de control remoto que podría ser aplicado a cualquier tipo de vehículo. Llevó a la práctica la patente construyendo el "teleautomaton", un vehículo naval de aproximadamente un metro de largo capaz de: moverse, detenerse, girar a izquierda y derecha, encender/apagar luces y enviar señales de radio. Este invento de Tesla resurgió en 1912 como prototipo de torpedo radiocontrolado.

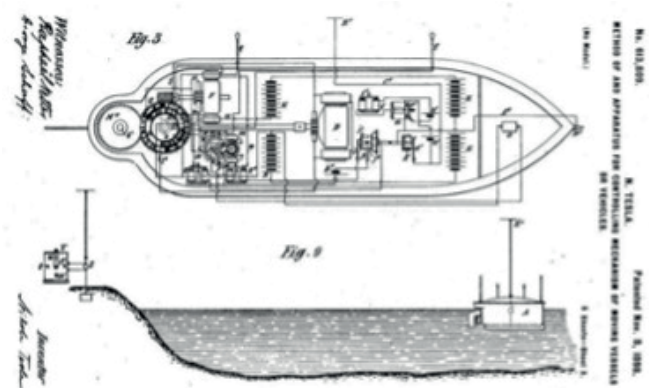
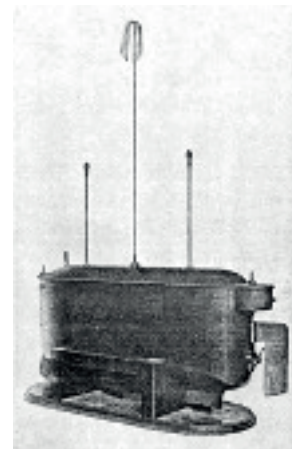


Ilustración 1. 1898 – TELEAUTOMATON – NIKOLA TESLA
[Fuente: <https://cyberneticzoo.com/precyber/1898-telautomaton-nikola-tesla-serbianamerican/>]

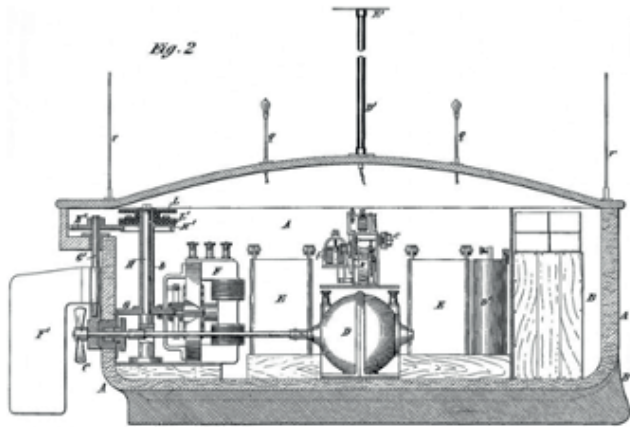


Ilustración 2. Barco radiocontrolado de Tesla, de aproximadamente 4 ft de largo por 3 ft de alto, utilizaba una serie de baterías de almacenamiento E para alimentar el motor de propulsión D y el motor de dirección [Fuente: <https://mechanixillustrated.technicacuriosa.com/2017/02/19/a-brief-early-history-of-unmanned-systems/>].

Mientras tanto, en 1903 el inventor español Leonardo Torres-Quevedo presentó su primer Telekino, un prototipo que mejoró el sistema de control inalámbrico de Tesla de 1898. Este invento aumentaba el número de posiciones del interruptor giratorio e incluía discos codificadores separados para la propulsión y la dirección. En 1904 exhibió otro prototipo en el Lago de la Real Casa de Campo de Madrid que pudo controlar desde 250 metros de distancia con un alcance de 20 o 30 metros; es el primer ejemplo conocido de un vehículo terrestre (un triciclo) no tripulado, controlado por radio. Un año después, un tercer prototipo (una barca) recorrió 2 kilómetros en el estuario de Bilbao.

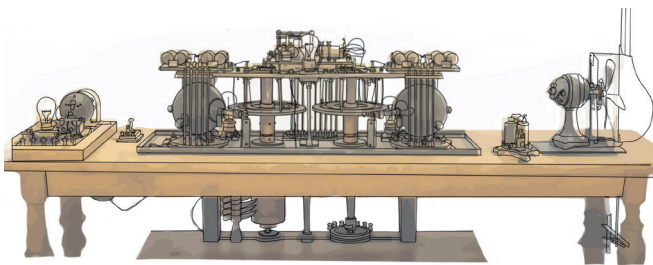


Ilustración 3. Telekino 1903. Leonardo Torres-Quevedo.

Por su parte, Elmer Ambrose Sperry desarrolló en 1909 un giroestabilizador para una aeronave, de comportamiento mediocre y peso demasiado elevado, pero apoyado por el pionero de la aviación Glenn Hammond Curtiss logró mejorarlo y en 1911 era más ligero e implementaba control en los 3 ejes.

Durante la Primera Guerra Mundial la Marina de los Estados Unidos encargó a Charles Kettering y Elmer Ambrose Sperry el desarrollo de un torpedo aéreo, conocido como Bomba Volante (Torpedo Aéreo Kettering o Kettering Bug). Este innovador dispositivo hacía uso del giroestabilizador de Sperry para el control y orientación y contaba con una aeronave construida con la colaboración de Orville Wright y equipada con un motor diseñado por Ford. Tras realizar varios intentos y ajustes de la aeronave construida por la Compañía Dayton-Wright, finalmente, en octubre de 1918, se logró realizar un vuelo exitoso. Este vuelo, que abarcó aproximadamente 900 metros, **representó el primer vuelo controlado de una aeronave no tripulada**, marcando un hito en la historia de la aviación no tripulada, por lo que podría considerarse el primer dron.

El Kettering Bug no solo allanó el camino para el desarrollo de futuros drones, sino que también demostró la capacidad de lanzar torpedos con precisión mediante una catapulta, consolidándose como un precursor de la tecnología de drones modernos.



Ilustración 4. Imagen del Hewitt-Sperry Automatic Airplane en 1918 [Fuente: [The Early Days Of Drones Unmanned Aircraft From World War One And World War Two \(warhistoryonline.com\)](http://The Early Days Of Drones Unmanned Aircraft From World War One And World War Two (warhistoryonline.com))].

También en 1916 el capitán A.H. Low construyó en Reino Unido el "Aerial Target" controlado por radio desde tierra para servir de blanco aéreo para entrenamiento y como defensa contra los zepelines.



Ilustración 5. Aerial Target de Low. [Fuente: Imperial War Museum, UK]

Durante la década de los 30, los pioneros del aeromodelismo comenzaron a explorar el control remoto de sus modelos utilizando las tecnologías emergentes de la época.

Cabe destacar la labor de los hermanos Good, quienes fueron los artífices de la instalación de un equipo de control remoto en un planeador. Fruto de esto, nació el primer aeromodelo de radio control conocido como “Big Guff”.



Ilustración 6. Hermanos Good demostrando en 1937 el primer vuelo por control remoto de un aeromodelo. [Fuente: Ted Just National Model Aviation Museum]

Durante la Segunda Guerra Mundial este tipo de operaciones se vieron nuevamente impulsadas por los avances en los sistemas de radio debido a su interés en aplicaciones militares.

El Reino Unido se centró en la creación de un blanco aéreo con control completo por radio, el famoso “Queen Bee”. Su operativa tenía como objetivo el entrenamiento de las fuerzas de artillería durante la guerra.



Ilustración 7. Queen bee [Vintage wings of Canada: <https://www.vintagewings.ca/stories/mother-of-all-drones>]

Asimismo, Estados Unidos desarrolló el RP4 como sistema de entrenamiento de sus fuerzas armadas durante el conflicto. También se usaron dispositivos de control remoto para reconocimiento de zonas bajo control de Alemania y, en los últimos años de la Guerra, el GB-1 (Glide Bomb) con el que se incorporaron alas para llevar las bombas a mayor distancia.



Ilustración 8. GB-1

Estas aeronaves inspiraron a los alemanes para perfeccionar el primer misil de crucero equipado con motor a reacción, el “V1 Vengeance Weapon” que viajó más de 150 millas a una velocidad de 400 nudos. Al mismo tiempo, los alemanes bombardeaban Londres con más de 100 drones-bomba diarios, lo que incitó a los británicos a desarrollar los primeros sistemas anti-dron.

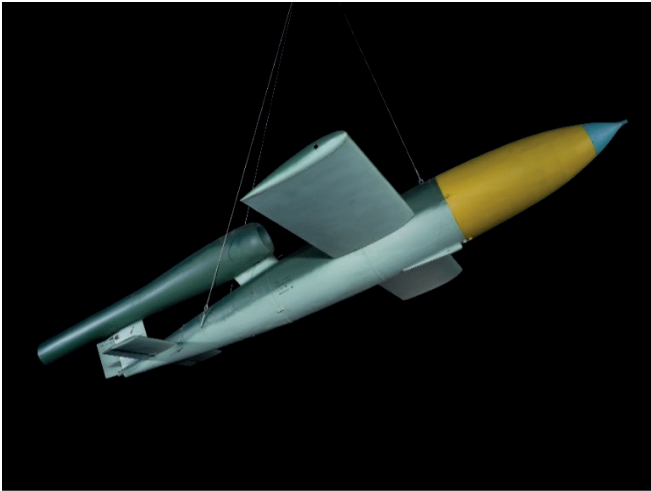


Ilustración 9. V1 Vengeance Weapon [National Air and Space Museum]

Tras las grandes guerras

Durante la posguerra, los modelos que más se desarrollaron fueron los blancos aéreos no tripulados como “Falconer” o “Schelduck” de la compañía Radioplane (o Northrop, como se denominó posteriormente). Los modelos iniciales se fueron mejorando y se fabricaron hasta los años 80.

En la década de los 50 se desarrollaron los señuelos antirradar radiocontrolados. Se lanzaban desde bombarderos para confundir a los sistemas radar enemigos.

Y durante la década de los 60, con la normalización de aeronaves militares a reacción, surgió la necesidad de desarrollar blancos aéreos más rápidos y de mayor alcance. Ejemplo de esto es el Teledyne Ryan Firebee, cuyo programa comenzó a finales de los 50 pero continuó desarrollándose durante la década siguiente con una amplia diversidad de tipos. Así, el Firebee portó armas de ataque terrestre, cámaras para misiones de reconocimiento o diversos sensores. Ciertamente no se diseñaron con la idea moderna de un dron, pero sus desarrollos y uso han contribuido a la evolución tecnológica necesaria para llegar a lo que actualmente entendemos por dron. Otro ejemplo característico de esta década fue el helicóptero Gyrodyne QH-50 DASH, que es considerado el primer dron de ala rotatoria y el primero con misión primaria de ataque; en concreto, en rol antisubmarino operando desde fragatas americanas para ampliar el alcance de torpedos u otras armas.



Ilustración 10. Teledyne Ryan Firebee UAV (target variant, IDF designation Shadmit) at IAF muzeun, Hatzirim airbase, Israel. 2006. (CC BY 2.5)



Ilustración 11. U.S. Navy. (2023). A QH-50 conducts flight tests [off the USS Nicholas. photograph. Retrieved 2024, from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gyrodyne_QH-50_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gyrodyne_QH-50_(cropped).jpg).]

En cuanto a las aeronaves civiles, la década de los 60 supuso el desarrollo de nuevos materiales plásticos y la evolución de las radios portátiles para control remoto. Lo cual facilitó la creación de aviones de aeromodelismo de radiocontrol más avanzados como queda patente en numerosas publicaciones de la época. Entre otros, se comercializaron por primera vez los sistemas de radiocontrol proporcionales, que permitían regular la deflexión de las superficies de control y las revoluciones por minuto de los motores con mayor precisión. También se inventaron en esta época los motores eléctricos de corriente continua sin escobillas (Brushless DC), que años más tarde serían la norma para los civiles. Sin embargo, la tecnología aún no estaba lo suficientemente madura para la explotación comercial del aeromodelismo.

Esta década también destaca por una **ampliación de las características de vuelo** de las aeronaves con control remoto en el ámbito militar, con desarrollos tanto de versiones

supersónicas de ala fija, como de sistemas de ala rotatoria. Sin embargo, la mayoría aún eran aeronaves de radiocontrol para operar en línea de vista de radio (RLOS-Radio Line Of Sight); no se disponía aún de avanzados sistemas de control o autopilotos, lo que limitaba la operatividad de las aeronaves. Además, muchas de estas aeronaves tenían limitaciones a la hora del lanzamiento y recuperación, necesitando un lanzamiento asistido por cohetes o ser lanzados desde una aeronave en vuelo y con recuperación mediante paracaídas.

Este paradigma cambiaría en las siguientes décadas. Las limitaciones de alcance y lanzamiento de drones de los 60, como son el Ryan Model 147 “*Lightning Bug*” (desarrollo del Ryan Firebee) o el Canadair CL-89, generaron el interés de distintas naciones en trabajar en la mejora de drones de reconocimiento y vigilancia de larga duración y alcance. Esto se materializa, por ejemplo, en varios programas de la Fuerza Aérea de EEUU y DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), del Departamento de Defensa de EEUU que introdujeron los conceptos de HALE (High Altitude Long Endurance) y MALE (Medium-Altitude Long-Endurance) con drones capaces de volar misiones de más de 20 horas, como el Teledyne Ryan YQM-98 (Compass Cope R), así como modelos que marcaron tendencias para los actuales, como el proyecto Amber de finales de los 80 que sirvió de base para el desarrollo del MQ-1 Predator de General Atomics.



Ilustración 12. Teledyne Ryan YQM-98 [Compass Cope R]

En los años 70 y 80 ya se generalizaron los autopilotos básicos para mejorar la navegación y el guiado BVLOS (Beyond Visual Line of Sight), mayormente basados en sistemas inerciales giroscópicos, e incluso aparecen los primeros sistemas de AFCS (Automatic Flight Control System) computarizados, mejorando significativamente las capacidades operativas.

Esto, unido al desarrollo de novedosas configuraciones como la de doble cono de cola y hélice impulsora que podemos ver en el IAI Scout y el IAI Pioneer, darán forma a los drones modernos de corto y medio alcance. Asimismo, durante estas décadas se cimentan los roles de las aeronaves de ala rotatoria de despegue vertical como el estándar para misiones de reconocimiento y vigilancia a muy corto alcance.



Ilustración 13. IAI Scout, en primer plano

El abaratamiento de componentes electrónicos y baterías permitieron fomentar progresivamente la expansión del mercado de los drones para uso civil, sobre todo de modelos eléctricos, en los que se incorporan los primeros transmisores digitales y computarizados. Sin embargo, el uso de los drones en el entorno civil seguiría limitado a operaciones en VLOS y las disciplinas de recreo y deportivas asociadas al aeromodelismo. Además, con las presiones de la Guerra Fría aún presentes, no será hasta la caída del muro de Berlín y la posterior disolución de la URSS cuando comenzará a fluir la transferencia de conocimiento del mundo militar al mercado civil.

La historia más reciente

Desde los años 90 el desarrollo de los UAV se beneficia de una **mayor disponibilidad del sistema de posicionamiento global y de las comunicaciones por satélite**. De esta forma, se consigue una notable mejora tanto en el alcance como en la precisión y se impulsa el desarrollo de sistemas de medio y largo alcance, entre los que destacaron el Seeker de Denel y el Gnat de General Atomics, respectivamente. Tras la experiencia con el segundo, a finales de esta década surgen el MALE UAS Predator y el HALE Global Hawk de Northrop-Grumman.

Durante esos años se desarrolló e introdujo en Japón el primer modelo de producción a gran escala de un dron VTOL

(Vertical Take Off and Landing): el Yamaha R50, y su modelo mayor: el R-Max, que se utilizó para siembra de campos de arroz y fumigación, teniendo un gran éxito tanto por su eficacia en la misión como por la colaboración con entidades reguladoras.



Ilustración 14 Yamaha R-Max

Durante la década de los 2000, para poder transportar radares de apertura sintética, utilizados en teledetección y cartografía a cada vez mayores distancias, se hizo necesario aumentar el alcance y la autonomía de las plataformas existentes, lo cual obligó a desarrollar drones cada vez más grandes y pesados, surgiendo así el modelo Predator B. Esta década presenció el incremento en el uso militar de los sistemas no tripulados y la incorporación de armamento en drones de largo y medio alcance, como en el caso de la versión posterior del Predator B, conocido como MQ-9 Reaper.

Durante las siguientes décadas la tecnología militar ha continuado avanzando y otras potencias han ido desarrollando sus propios sistemas. Europa, por su parte, impulsó el diseño de plataformas que respondieran tanto a sus necesidades estratégicas como a lograr una mayor independencia tecnológica. Así surgieron proyectos como el EURODRONE, concebido como una solución europea para misiones de vigilancia y reconocimiento de larga duración cuyo primer vuelo se prevé para 2027, y el SIRTAP, un dron táctico de tamaño medio desarrollado por España para misiones ISR (Inteligencia, vigilancia y reconocimiento), con su primer vuelo estimado para finales de 2025.



Ilustración 15. Prototipo SIRTAP de AIRBUS expuesto en FEINDEF 2025.

En la actualidad, el desarrollo de nuevas variantes y la evolución de estas aeronaves y sus sistemas de control ha experimentado un crecimiento exponencial. Esto se refleja en mejoras significativas en el alcance operativo, la capacidad de carga y autonomía de vuelo. A medida que estos drones comenzaron a ser más visibles en operaciones reales y aparecieron en películas comerciales y otros medios de comunicación masiva, el público general empezó a familiarizarse con esta tecnología. Términos como UAV (Unmanned Aerial Vehicle), UAS (Unmanned Aircraft System), RPA (Remotely Piloted Aircraft) o RPV (Remotely Piloted Vehicle) que antes eran exclusivos del ámbito militar, pasaron a ser conocidos y comprendidos como una tecnología innovadora con múltiples aplicaciones y beneficios en el mundo civil.

A raíz del desarrollo y abaratamiento de los sistemas de control de vuelo digitales y del avance de las baterías impulsadas por la tecnología de ion-litio, surgieron los primeros cuatrirrotores de pequeño tamaño. Esto marcó el inicio de un crecimiento sin precedentes de los drones de tipo VTOL, especialmente dentro del ámbito civil, donde han ganado popularidad entre usuarios domésticos o pequeños profesionales. A partir de 2010, se produjo una gran proliferación de drones con fines comerciales y recreativos, abriendo un abanico de aplicaciones en misiones civiles y comerciales. Entre ellas destacan la agricultura (monitorización de los cultivos, siembra y fertilización), fotografía y cinematografía, operaciones de búsqueda y rescate (SAR, Search and Rescue), vigilancia de líneas eléctricas y tuberías o la extinción de incendios, entre otras.

El creciente interés en estos nuevos usuarios ha impulsado la investigación y el desarrollo europeo en este ámbito. Este esfuerzo tiene sus raíces en el proyecto INOUI (Innovative Operational UAS Integration), que surgió como parte de una convocatoria de investigación relacionada con la innovación en el marco del Cielo Único Europeo. Los resultados de este proyecto sirvieron como base para que SESAR JU (Single European Sky ATM Research Joint Undertaking), una asociación público-privada europea establecida en 2007 para acelerar la implementación de estas políticas del Cielo Único Europeo, comenzara a investigar la integración de drones con otro tipo de operaciones, es decir, en espacio aéreo no segregado. Este enfoque ha dado lugar a una serie de proyectos innovadores en los últimos años, fortaleciendo la cooperación entre países y empresas para avanzar en la integración segura y eficiente de drones en el espacio aéreo europeo.

Con el avance de la tecnología y la expansión de las aplicaciones comerciales de drones, el enfoque se amplió para incluir conceptos como la movilidad aérea urbana. En 2016, en respuesta a la Declaración de Varsovia, **se desarrolló en Europa el concepto de U-Space**, con el objetivo de aprovechar el potencial de los drones para crear nuevos empleos y generar oportunidades comerciales, principalmente en áreas urbanas. A raíz de este concepto, SESAR ha invertido en el desarrollo de un programa de investigación enfocado en la gestión de los vuelos de drones a baja altitud, impulsando así el futuro de la movilidad aérea urbana.

Tras numerosos proyectos de investigación y la creciente demanda en el uso de drones, la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA, European Aviation Safety and Security Agency), y otras autoridades de aviación civil a nivel global comenzaron a desarrollar regulaciones específicas para los Sistemas de Aeronaves no Tripuladas (UAS). Todo este avance culminó con la formalización de los marcos regulatorios europeos de aeronaves no tripuladas y el espacio U-Space, publicados respectivamente, en 2019 y 2021. Estas regulaciones establecen las bases para la operación segura y eficiente de drones en el espacio aéreo europeo, promoviendo su integración en el entorno aéreo convencional. Se verán con mayor detalle en próximos capítulos del cuaderno. Además, debido al creciente interés en las operaciones de “taxis aéreos” o “aerotaxis” y puesto que en los desarrollos actuales este tipo de operaciones las realizan UAS de despegue y aterrizaje vertical (VTOL por sus siglas en inglés Vertical Takeoff and Landing), la Comisión Europea ha adoptado en 2024 un marco regulatorio específico para estas aeronaves. Este marco tiene como

objetivo unificar y armonizar las normas en todos los Estados miembros de la Unión Europea, mejorando la supervisión y garantizando altos estándares de seguridad operativa. Respecto a la situación en España, el sector de los drones está en constante evolución y crecimiento. Al finalizar el año 2024, había 119.712 operadores de drones registrados en la base de datos de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), un 27% más respecto al año 2023. Este notable aumento consolida el crecimiento significativo del sector en España que viene registrándose desde 2021.

Instituciones clave como ENAIRE están trabajando activamente con la industria española para desarrollar sistemas avanzados de gestión de tráfico aéreo que faciliten la integración segura de drones en el espacio aéreo regulado. Además, entidades como AENA, Bluenest y Ferrovial están liderando iniciativas en el desarrollo de Vertipuertos, infraestructuras esenciales para el despliegue de los nuevos sistemas de movilidad aérea urbana eVTOL.

El ecosistema industrial en España también está en plena expansión con la participación de actores relevantes como el INTA, pionero en el sector, junto a empresas de renombre como Airbus D&S, Aertec, SCR, WAKE o Alpha, entre otros. Por su parte, la autoridad de seguridad aérea española, AESA, continúa trabajando activamente para establecer de manera progresiva los criterios de regulación y certificación necesarios. Un ejemplo de este avance es la reciente publicación del *Real Decreto 517/2024 sobre UAS, de 4 de junio, por el que se desarrolla el régimen jurídico para la utilización civil de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*.

EVOLUCIÓN TERMINOLÓGICA

Desde su creación, la tecnología de los drones ha avanzado rápidamente, y con ella, también ha evolucionado la terminología asociada. Es común referirse a estas aeronaves no tripuladas de diferentes formas según el contexto o la literatura, pero muchos de estos términos no son intercambiables, ya que presentan matices específicos. A continuación, se explican los conceptos más utilizados.

El término “dron” comenzó a emplearse en los años 30, del pasado siglo, coincidiendo con la aparición de los primeros aviones controlados a distancia. Este término, derivado del inglés drone (zángano), hace referencia al zumbido característico que emiten, similar al sonido de las abejas en vuelo.

Durante la guerra de Vietnam y en los años posteriores, se popularizó el término **RPV** (*Remotely Piloted Vehicle*, Vehículo pilotado por control remoto), en un momento en el que las tecnologías de control remoto y la aviación no tripulada comenzaban a desarrollarse más ampliamente, particularmente en el contexto militar.

En los años 90 se comenzó a utilizar el término de **UAV** (*Unmanned Aerial Vehicle*, Vehículo Aéreo no Tripulado) para describir a las aeronaves robóticas y reemplazando al término RPV. UAV hace referencia solo al vehículo aéreo, dejando de lado otros componentes del sistema.

En la actualidad, la nomenclatura **RPA** (*Remotely Piloted Aircraft*, Aeronave Pilotada a Distancia) es comúnmente utilizada por la OACI. A diferencia de UAV, el término RPA se refiere exclusivamente a aquellas aeronaves que son controladas a distancia por un piloto, lo que significa que un piloto siempre mantiene el control de la aeronave. Por tanto, las aeronaves autónomas quedan excluidas de esta categoría.

El término **RPAS** (*Remotely Piloted Aircraft System*, Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia) incluye no solo el RPA, sino también a su estación o sus estaciones conexas de pilotaje a distancia, los enlaces requeridos de mando y control, y cualquier otro componente según lo especificado en el diseño de tipo.

Finalmente, el término más amplio es **UAS** (*Unmanned Aerial System*, Sistema Aéreo no Tripulado). Este concepto abarca no sólo la aeronave, sino también la estación de control en tierra, el enlace de datos para el mando y control del vehículo aéreo y cualquier sistema de apoyo asociado. UAS incluye tanto a los sistemas tripulados a distancia (RPAS) como a aquéllos que operan de manera autónoma, esto es, en los que el piloto en tierra no necesita controlar ni pilotar activamente el vehículo.

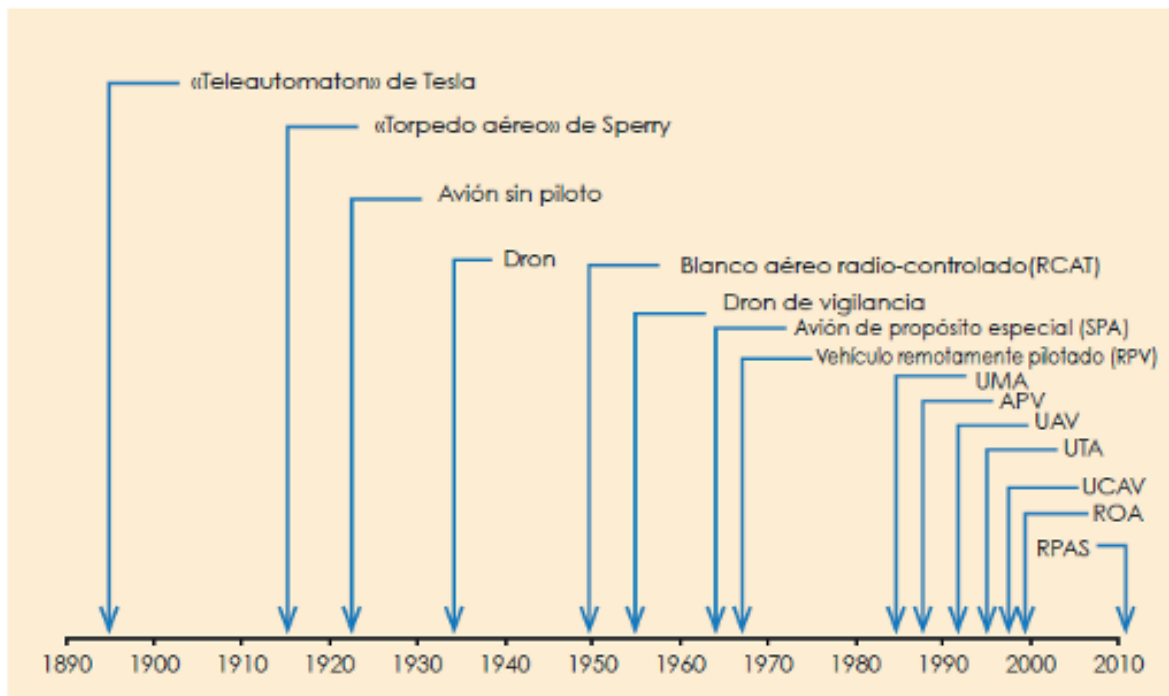
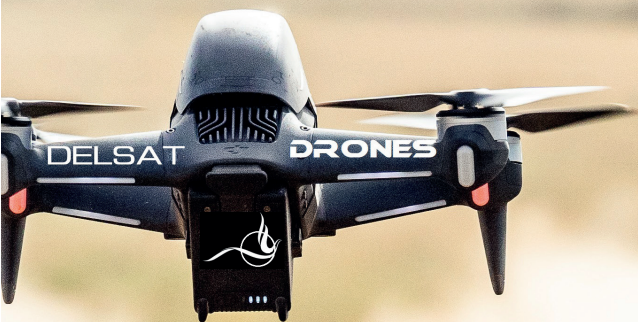


Ilustración 9. Cronología de los nombres aplicados hasta el año 2010
[Fuente: "HISTORICAL EVOLUTION OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLES TO THE PRESENT"]

REFERENCIAS

1. Cuerno Rejado, C. (2015). Origen y desarrollo de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto. En Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil (pp. 15–32). Fenercom.
2. Cuerno-Rejado, C., Garcia-Hernandez, L., Sanchez-Carmona, A., Carrio-Fernandez, A., Sanchez-Lopez, J., Campoy-Cervera, P.. (2016). EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS HASTA LA ACTUALIDAD. INVE_MEM_2015_203893.pdf (upm.es)
3. Noll, B. (2023). The history of Radio Control. The history of Radio Control | Model Aviation. <https://www.modelaviation.com/history-of-rc>
4. Delgado, V. (2016). Historia de los drones. El Drone: <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>.
5. Bueno Gómez, J., Ciruelos Pardo, C., Peces Pascual, S. (2016). Los RPAS en el Cielo Único Europeo: Investigación pasada, presente y futura.
6. U.S. Army (2010) U.S. Army Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2010-2035. Eyes of the Army. U.S. Army UAS Center of Excellence (ATZQ-CDI-C) (chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://irp.fas.org/program/collect/uas-army.pdf)
7. <https://blog.sandglasspatrol.com/el-primer-vuelo-de-un-avion-no-tripulado-una-bomba-volante-de-la-primera-guerra-mundial/>.
8. <https://blog.sandglasspatrol.com/el-primer-vuelo-de-un-avion-no-tripulado-una-bomba-volante-de-la-primera-guerra-mundial/>
9. Langley aerodrome No. 5 | WWI Aviation History | Britannica (Tom D. Crouch)
10. Airbus desarrollará para España 27 drones SirTAP por 500 millones de euros. (2023, 29 noviembre). Infodron. <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/4632743/espana-firma-airbus-compra-27-drones-sirtap>
11. <https://vadebarcos.net/2017/02/18/teleautomaton-tesla-primer-dron-marino/>
12. <https://mechanixillustrated.technicacuriosa.com/2017/02/19/a-brief-early-history-of-unmanned-systems/>
13. <https://historycollection.com/the-story-of-the-kettering-bug-the-worlds-first-aerial-drone/>
14. <https://www.flyingmag.com/how-were-drones-used-during-wwi-and-wwii/>



Aplicación actual de un dron para grabación de video [Fuente: DELSAT International Drones].



Dron para competiciones de velocidad.

SISTEMAS AÉREOS NO TRIPULADOS

Jaime Torrecilla Puebla
María Anta García
Esther Nistal Cabañas
Pedro José García Moreno
Olga Clara Aranda García
Raúl García González
María Eugenia Pérez de Mata

Este capítulo se centra en las características de los UAS de pequeño y mediano tamaño cuyo diseño está condicionado por los usos que va a tener y por el entorno en el que va a operar. Las características que se incluyen y desarrollan con detalle son el diseño de la plataforma, su configuración (ala fija o rotatoria), peso, tipo de propulsión, número y ubicación relativa de los motores y los sistemas embarcados necesarios para la operación. Se proporciona información sobre las prestaciones más importantes como son alcance, autonomía, peso máximo y velocidad.

Se analizan los sistemas de propulsión y energía, elementos clave que determinan el desempeño de la aeronave en términos de autonomía, alcance, velocidad, maniobrabilidad y capacidad de carga. Se describen las distintas tecnologías disponibles, diferenciando entre motores térmicos, eléctricos e híbridos.

En cuanto al sistema de comunicaciones, mando y control, los drones forman parte de un sistema complejo que incluye, además de la aeronave, una estación de tierra, así como antenas a bordo y en tierra para la transmisión y recepción de señales. Ello permite controlar la aeronave y el estado de sus sistemas desde la estación terrestre de manera precisa.

Para garantizar la seguridad del vuelo, los UAS cuentan con sistemas de vigilancia y navegación embarcados. Estos últimos permiten monitorizar la posición, actitud y trayectoria exactas de la aeronave, mientras que los sistemas de vigilancia ayudan a prevenir colisiones con otras aeronaves u obstáculos fijos. Este capítulo analiza los sistemas de vigilancia actuales y su evolución futura.

Finalmente, los UAS incorporan la carga útil o carga de pago, que son los sistemas embarcados que le permiten cumplir su misión o la prestación de un servicio: cámaras, radares, antenas de telecomunicaciones, depósitos de agua para la extinción de incendios, sistemas de pulverización de productos agrícolas, y un largo etcétera.

También se considera carga útil, en este caso pasiva, aquellos objetos que simplemente se desea transportar.

Para concluir, se ofrece un resumen del estado del sector de aeronaves no tripuladas en España, aportando cifras contrastadas sobre el número de aeronaves y operadores. Asimismo, se ofrece una visión sobre el papel que ha jugado AESA en el desarrollo del sector, desde que se aprobó la primera ley pionera de aplicación solo en España en 2014, hasta que EASA promulgó la regulación comunitaria unos años más tarde.



1. CONFIGURACIONES

Existen múltiples criterios para clasificar los UAS, por ejemplo, según su configuración, entendida como modo de sustentación y modo de aterrizaje y despegue. A continuación, se expondrán las configuraciones más relevantes.

1.1. Modo de sustentación

La célula, o estructura, de toda aeronave es la piedra angular que soporta todos los demás sistemas. Esta debe ser capaz de soportar las cargas aerodinámicas del vuelo, así como las fuerzas inerciales debidas al peso del vehículo y su carga; y, además, debe ser ligera para maximizar la autonomía y eficiencia de la aeronave.

A su vez, los métodos de sustentación del UAS lo harán más o menos adecuado para cumplir con las misiones para las que se destine y las cargas de pago transportadas.

Según su modo de sustentación, los UAS se clasifican en dos grandes grupos:

- Por flotabilidad
- Por aerodinámica

El primer grupo lo constituyen los llamados globos y dirigibles. Estos suelen ser adecuados para misiones de observación continua y vigilancia, con importantes limitaciones de movilidad, de manera que su uso, en los casos de pequeño y medio tamaño, se ve restringido principalmente a labores de observación meteorológica.

Los UAS cuyo modo de sustentación está basado en la aerodinámica, se subdividen a su vez en tres tipos principales:

- Ala fija
- Ala rotatoria
- Híbridos

1.1.1. Ala fija

La estructura está formada por un fuselaje y unas alas fijas, de forma similar a un avión convencional.



Ilustración 1. UAS de Ala Fija [1] [2]

Este tipo de configuraciones predominan en drones de carácter militar. Son ideales para operaciones que requieren mayor autonomía y alcance. Esto se debe en parte a que el uso de perfiles aerodinámicos permite generar fuerza de sustentación (generada por las alas y superficies de control) de manera independiente a la fuerza de empuje (generada por los motores). El diseño estructural estará, por lo tanto, muy ligado a la elección de los perfiles y los cálculos de cargas aerodinámicas de las alas en base al rendimiento esperado (velocidad, altitud de vuelo, etc.).

Existen grandes diferencias entre los pequeños UAS de ala fija, donde el peso y la ubicación precisa de las baterías son factores determinantes que condicionan el tamaño de la aeronave, lo que lleva a optar por diseños de ala volante; y los grandes UAS de gran autonomía, que se construyen con una gran superficie alar, en ocasiones cubierta con paneles solares para maximizar la autonomía y alcance, como el Skydweller, que completó su primer vuelo no tripulado en 2024.

Configuración	Ala volante
Envergadura	450mm
MTOW	67g
Carga de pago	Cámara (3g)
Autonomía	20 minutos



Ilustración 2. Atlas 450 FPV Micro Wing



Ilustración 3. Skydweller UAV solar

Para aeronaves no tripuladas civiles de ala fija, lo más común será una configuración propulsora (push propeller), donde la hélice va montada en la parte posterior de la aeronave. Esta configuración proporciona varias ventajas frente a las hélices tractoras (habituales en aeronaves de aviación general), ya que permite no solo tener espacio para los

sensores y cargas de pago en la parte frontal del vehículo (mejor visibilidad "hacia delante") sino que además permite alejar las vibraciones e interferencias electromagnéticas de los sensores embarcados.

Las principales ventajas de los UAS de ala fija [2] son:

- Mayor eficiencia, que permite mayor autonomía a igualdad de tamaño.
- Mayor velocidad, lo que supone, combinado con lo anterior, cubrir una distancia o un área mucho mayor, siendo más indicados en actividades de cartografía o teledetección.
- Huella sonora sensiblemente menor, por lo que resultan más indicados para operaciones de vigilancia.
- Mayor rango climático para operaciones en términos de temperatura, viento y precipitaciones.

1.1.2. Ala Rotatoria

Un dron de un solo rotor (también conocido como helicóptero de un solo rotor) cuenta con un único rotor de gran tamaño para elevarse y propulsarse. Al igual que los helicópteros tradicionales, tiene un rotor de cola más pequeño para neutralizar el par del rotor principal y controlar el movimiento de guiñada¹. Los drones monorrotor pueden permanecer en el aire más tiempo y transportar cargas más pesadas que los diseños multirrotor.

Por definición, se considera multirrotor [3] a un dron que posee más de dos rotores o motores (típicamente 3, 4, 6 u 8). Está formado por una serie de brazos que sostienen los motores y una parte central en la que se anclan los brazos y donde se alberga toda la electrónica y componentes. La inmensa mayoría de los UAS para uso civil son multirrotos ya que dicha configuración se adapta mejor a las misiones predominantes en la actualidad, como la toma de imágenes y la realización de videos para el sector audiovisual.

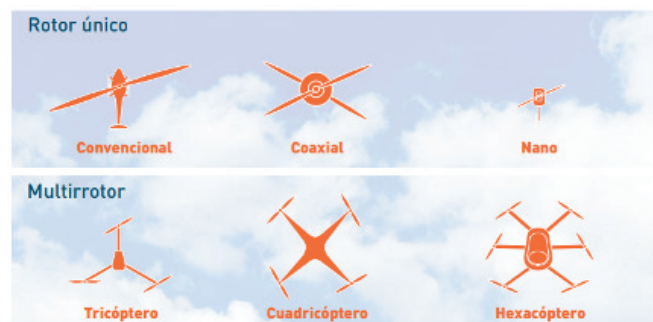


Ilustración 4. UAS de Ala Rotatoria [1] [2]

En el diseño de drones de tamaño reducido, la selección tanto del número como de la ubicación de los motores es un elemento clave que afecta directamente a su rendimiento, estabilidad y capacidad de maniobra. Estos factores impactan no solo en la eficiencia energética y la carga útil del dron, sino también en su habilidad para ejecutar tareas específicas en diferentes entornos. En esta sección, se abordarán las principales consideraciones a tener en cuenta al establecer la configuración óptima de los motores, incluyendo la distribución del peso, la redundancia de sistemas y los efectos aerodinámicos.

CONFIGURACIONES MULTIRROTOR

Sin lugar a duda, la configuración más habitual es la de un vehículo multirrotor con motores eléctricos. En concreto, un cuadricóptero con motores fijos es quizás la imagen que más se asocia a un dron de uso comercial y recreativo, como puede ser la serie de los DJI Phantom.



Ilustración 5. DJI Phantom [Cortesía de DELSAT International Drones]

Aun así, existe cierta variabilidad en la disposición de los motores, con la ayuda de armazones o bastidores que permiten instalar los motores y los diversos equipos necesarios sobre ellos. Por ejemplo, un cuadricóptero podrá tener sus motores dispuestos en forma de "x" o "+" relativos a la dirección de vuelo.

Aunque pueda parecer que la elección no tiene implicaciones, la disposición finalmente elegida modificará significativamente la controlabilidad de la aeronave. En el caso de configuración en "+", al estar los motores alineados con los ejes cuerpo del dron, el motor frontal y el trasero solamente controlarán el movimiento de cabeceo, mientras que los motores laterales solo controlarán el balanceo; sin

1. La guiñada es una rotación respecto del eje vertical de la aeronave (en aviación tradicional esto se consigue accionando el timón de dirección).

entrar en consideraciones más complejas, se puede concluir que esta configuración está bloqueada en guiñada, al estar los rotores fijos dos a dos a sus direcciones de giro correspondientes. Por otro lado, la configuración en “x” puede variar de manera diferenciada la velocidad de cada uno de los rotores para impartir un momento de guiñada sobre la aeronave con mayor facilidad.

Para drones más grandes, se utilizan diseños de hexacóptero u octocóptero, con sus diversas configuraciones. En la Ilustración 6 se muestran algunas de las configuraciones más habituales para drones multirrotor.

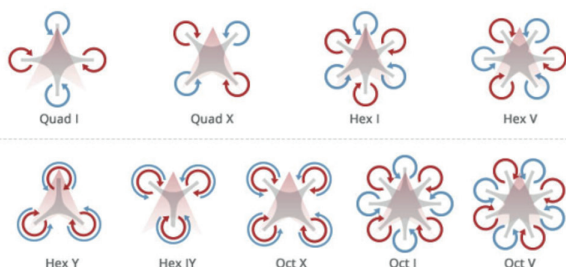


Ilustración 6. Configuración de motores en un multirrotor²

A modo de ejemplo, en la siguiente Ilustración se muestra el diagrama de fuerzas correspondiente a un cuadricóptero. Como se puede apreciar, el vehículo soportará la fuerza generada por el empuje de cada uno de sus motores, así como la resistencia aerodinámica y la fuerza de la gravedad debida al peso de la aeronave.

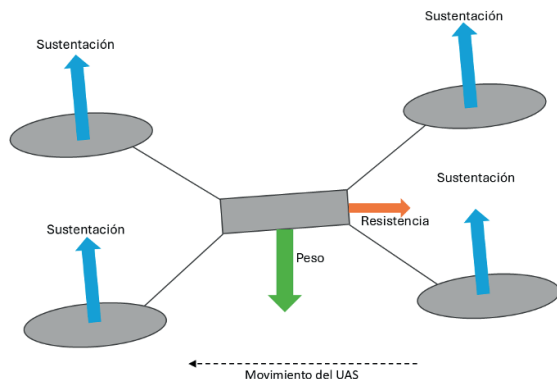


Ilustración 7. Diagrama de cargas de un UAS

Es precisamente mediante el balance de empuje en cada uno de los cuatro motores que podrá generarse un par de giro que permita controlar la dirección del vehículo. En este

caso, los brazos que sostienen los motores serán los que deban aguantar el mayor esfuerzo estructural debido al vuelo de la aeronave, pero ha de tenerse en cuenta que un factor crítico para proteger la integridad de la aeronave y su carga de pago es el tren de aterrizaje, por lo que el diseño estructural debe tener en cuenta los posibles impactos con el suelo en aterrizajes duros.

Las principales ventajas de los multirrotores [2] son:

- Despegue y aterrizaje vertical, lo que reduce las necesidades del espacio requerido en tierra para su operación. Para el despegue, las aeronaves de dimensiones reducidas de ala fija necesitan ser lanzadas por humanos, o por catapultas mecánicas. Para el aterrizaje, es necesario disponer de un espacio libre o de un paracaídas.
- Posibilidad de volar a punto fijo (hovering) o a muy baja velocidad, lo que resulta muy adecuado para aplicaciones de inspección, la segunda actividad más frecuente.
- Mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo. Mientras que los sistemas de ala fija siguen trayectorias curvilíneas, con unos radios de giro relativamente grandes y con velocidades de ascenso y descenso bastante estrictas, los multirrotores pueden volar prácticamente siguiendo cualquier trayectoria deseada en las tres dimensiones.
- Posibilidad de embarcar cargas más voluminosas en relación con su propio tamaño.

1.1.3. Híbridos/Mixtos

Presentan una combinación de rotores y ala fija, por lo que fusionan las ventajas de ambos diseños, ofreciendo resistencia y capacidades verticales. Esto puede lograrse mediante rotores basculantes («empuje vectorial») o conjuntos independientes de rotores que apuntan en diferentes direcciones («elevación y crucero»). La siguiente Ilustración muestra algunos de estos tipos.



Ilustración 8. UAS Híbridos [1] [2]

2. (REF: V. M. Martínez, F. M. de la Escalera, and S. G. Ruiz, Curso para pilotos de RPAS: enfoque práctico. Victor Mateo Martínez, 5 ed., 2016)

1.2. Modo de despegue y aterrizaje

Los UAS también se pueden clasificar atendiendo al modo de despegue y aterrizaje, distinguiéndose tres categorías:

- **Despegue y aterrizaje horizontal (HTOL)**, normalmente estos vehículos requerirán una pista para despegar y aterrizar, de forma similar a un avión convencional y, a menudo, utilizarán una configuración de ala fija.
- **Despegue y aterrizaje vertical (VTOL)**, también conocidos como VCA (VTOL Capable Aircraft)³ según las más recientes propuestas reguladoras en el ámbito EASA, suelen utilizar una configuración de rotor (o múltiples rotores) para proporcionar capacidad de despegue y aterrizaje vertical, así como propulsión horizontal en el aire, de forma similar a un helicóptero convencional.
- **Aeronaves híbridas**, que combinan las características de los HTOL y VTOL y, por lo general, pueden despegar y/o aterrizar verticalmente antes de pasar al vuelo horizontal, por ejemplo, usando un sistema dual para combinar alas fijas con rotores o usando un rotor basculante.

1.3. Tipo de sistema de control

Finalmente, dependiendo del sistema de control del UAS, se pueden distinguir tres categorías [4]: autónomos, pilotados remotamente y supervisados.

Los **autónomos** no requieren tener un piloto operando en tiempo real para controlar los movimientos de la aeronave, sino que operan de forma autónoma según una programación previa.

Los **pilotados remotamente** son los más extendidos y, como su propio nombre indica, requieren de un piloto que controle la aeronave en tiempo real desde la estación de control durante la operación.

Una solución intermedia son los **supervisados**, que consisten en aeronaves autónomas que son monitorizadas. Aunque el control táctico de la aeronave está automatizado, un operador humano puede actuar directamente sobre el dron durante el vuelo.

A modo de resumen, la siguiente ilustración muestra las diversas configuraciones presentadas a lo largo de este apartado:

3. Commission Implementing Regulation (EU) 2024/1111 of 10 April 2024 "vertical take-off and landing (VTOL)-capable aircraft (VCA)" means a power-driven, heavier-than-air aircraft, other than aeroplane or rotorcraft, capable of performing vertical take-off and landing by means of lift and thrust units used to provide lift during take-off and landing

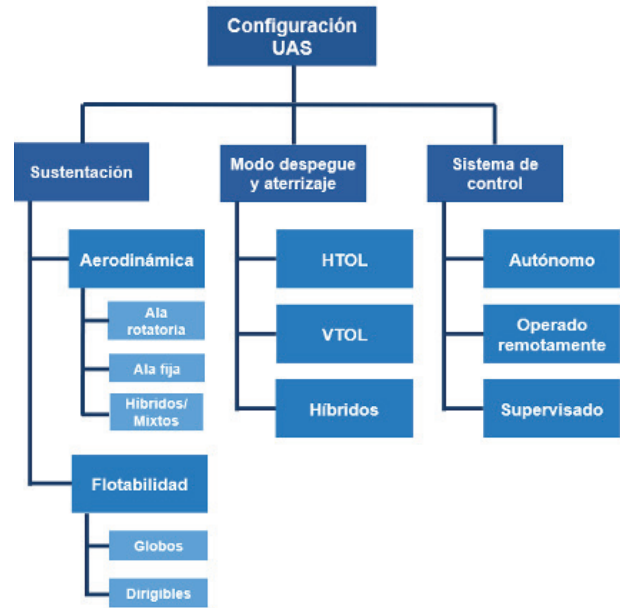


Ilustración 9. UAS Híbridos [elaboración propia]

2. SISTEMAS DE PROPULSIÓN Y ENERGÍA

La generación y gestión de energía es un elemento clave del UAS y sus características condicionan las prestaciones de la aeronave (autonomía, alcance, carga de pago) y, por ende, las misiones que puede realizar. Los sistemas de propulsión generalmente constan de fuentes de energía y unidades de potencia que incluyen motores. Según las fuentes de energía, los sistemas de propulsión de UAS se pueden clasificar de forma general en tres tipos: combustible fósil, eléctrico puro y, finalmente, híbrido combustible fósil-eléctrico. Entre ellos, los sistemas de propulsión de combustible tradicionales se pueden dividir en varias categorías: motores de pistón, motores de turbina de gas y estratorreactores.

Los UAS que utilizan sistemas de propulsión con combustibles tradicionales presentan las siguientes ventajas: alta carga útil, un amplio alcance, y un rápido reabastecimiento. Sin embargo, con el aumento de los problemas ambientales y el agotamiento de los combustibles fósiles, el problema energético se ha convertido en un desafío constante para todos los modos de transporte. Por lo tanto, los UAS híbridos y puramente eléctricos están ahora en el foco de atención. El sistema de propulsión híbrido consta de un motor de combustión y un motor eléctrico que trabajan juntos para generar la energía necesaria para el vuelo de la aeronave, ahorrando alrededor del 30% del consumo de combustible en comparación con el sistema de propulsión de combustible tradicional.

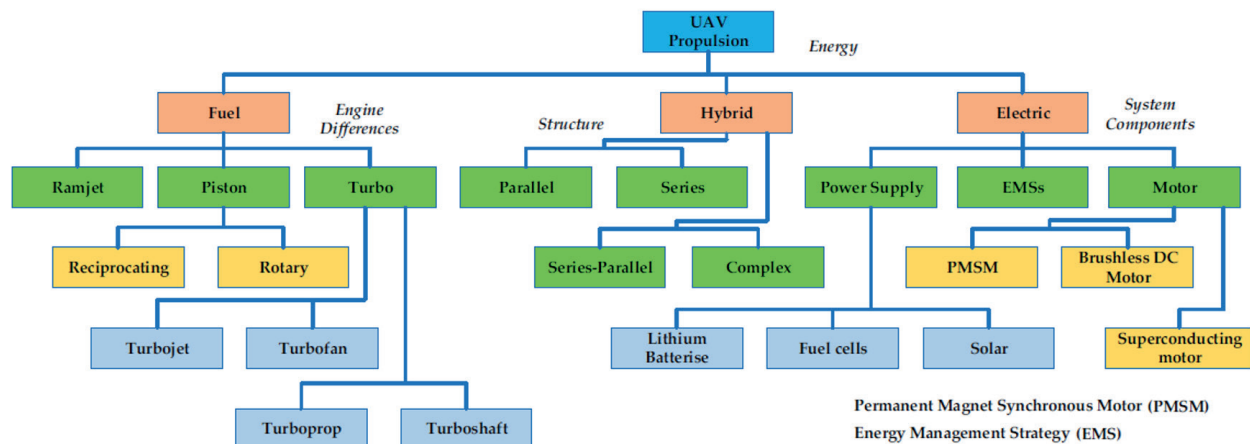


Ilustración 10. Clasificación de los Sistemas de Propulsión de los UAS [30]

Los sistemas de propulsión puramente eléctricos utilizan sólo motores eléctricos como dispositivo de fuente de energía y, por lo tanto, tienen bajas emisiones de carbono, baja contaminación, bajo coste y alta utilización de energía. Además, los UAS puramente eléctricos tienen una gama más amplia de fuentes de energía, como baterías de litio, pilas de combustible, energía solar, etc. Además, un sistema de motor eléctrico de alta potencia se puede descomponer en varios sistemas de motor de baja potencia con la misma potencia total y la eficiencia de todo el sistema permanecería invariable. Por lo tanto, se pueden usar múltiples motores de potencia relativamente baja para impulsar hélices de diámetro pequeño, en lugar de hélices grandes, para lograr una estabilidad mejorada del UAS y una estrategia de gestión de energía del UAS optimizada.

2.1. Sistema de Propulsión de Combustible Fósil

El sistema de propulsión de combustible fósil de un UAS generalmente consta de un sistema de suministro de combustible, un motor, una transmisión mecánica y una hélice. El motor es, sin duda, el núcleo del sistema de propulsión de combustible, desempeñando el papel de conversión de energía y suministro de energía del UAS. Los motores de combustible se pueden clasificar principalmente en dos categorías: pistón y turbina. Aunque los fundamentos del motor son los mismos que los de las grandes aeronaves tripuladas a bordo, los motores adecuados para un UAS deben tener características específicas de alta relación potencia-peso, volumen pequeño, larga resistencia, robustez y facilidad de mantenimiento.

2.1.1. Motor de pistón

Un motor de pistón es un motor de combustión interna que utiliza combustible fósil como fuente de energía para convertir la energía química en energía térmica y luego en energía mecánica. En los sistemas de propulsión de vehículos aéreos no tripulados, se requiere una combinación de un motor de pistón y una hélice para impulsar el vuelo de la aeronave. Los motores de pistón tienen diferentes ventajas: tecnología madura, estructura simple, bajo coste; pero también tienen limitaciones comparados con otras soluciones: bajo ratio potencia/peso, limitaciones de velocidades de rotación (no aptos para UAV de altas velocidades), bajas prestaciones a altas altitudes.

Debido a que se necesita inhalar una gran cantidad de aire durante el proceso de combustión, los motores de pistón a menudo solo son adecuados para UAS de baja velocidad y altitud baja o media. Por lo tanto, los motores de pistón deben agregar un compresor y un sistema auxiliar, utilizados en entornos de gran altitud, para aumentar el contenido de oxígeno en el aire de admisión, aumentar la potencia de salida y reducir su consumo de combustible.

Los motores de pistón de 2 tiempos son más aptos para los UAS de tamaño reducido, mientras que los motores de 4 tiempos se adaptan mejor a las necesidades de los UAS más grandes.

Por otro lado, el motor wankel, rotativo -no estrictamente de pistón- presenta ventajas operativas respecto a los motores de 2 o 4 tiempos, al no necesitar cigüeñal, ni dispositivos complejos de toma y expulsión de gases, con lo que se tiene un motor más pequeño y ligero, de bajo coste y alta eficiencia.

2.1.2. Motores de turbina

Se adaptan mejor a las necesidades operativas de altas prestaciones, tanto en velocidades como en altitudes, y para UAS de tamaño grande. Existen 4 tipos: **turbojet**, **turbofán**, **turboprop** y **turboshaft**. Los turbojet y turbofán presentan mejores prestaciones a altas velocidades y altitudes de vuelo (p.e. para UAV en misiones de reconocimiento), mientras que los turboprop tienen limitaciones de velocidad de punta de hélice (velocidad del sonido) y los turboshaft se utilizan principalmente en UAV con configuración de helicóptero.

En general, un **turbojet** está compuesto de una toma, un compresor, una cámara de combustión, una turbina y una tobera. El aire ingerido por la toma es comprimido y posteriormente mezclado con el combustible antes de ser quemado a alta presión y temperatura en la cámara de combustión, desde donde pasa a la turbina que mueve el compresor que hay tras la toma, y finalmente es expulsado por la tobera de salida generando empuje por medio de un chorro de aire muy caliente a alta presión.

Las turbinas **turbofán** mejoran la eficiencia de los turbojet incorporando un fan entre la toma y el compresor que aprovecha la energía de los gases de escape de forma más eficiente, aunque a costa de no alcanzar las prestaciones de alta velocidad de los turbojet. Cuanto mayor sea la relación de derivación (aire que pasa directamente del fan a la tobera de salida, frente al que pasa por el compresor/cámara de combustión/turbina) peores serán las prestaciones de alta velocidad.

Las turbinas **turboprop** tienen una configuración similar a los turbojet, con la diferencia de que la turbina en este caso no sólo mueve al compresor, sino también una hélice de gran diámetro que es la que genera el empuje para propulsar el UAV. Debido a las altas velocidades de rotación de la turbina, es necesario incorporar un demultiplicador que reduzca la velocidad de rotación de la hélice y evite que la punta de pala alcance velocidades sónicas. Las turbinas turboprop presentan ventajas en la relación potencia peso, bajas vibraciones y estructura más compacta que los tradicionales motores de pistón, y son más eficientes que los turbofan en aplicaciones de baja velocidad (p.e. Predator-B).

Las turbinas **turboshaft** tienen una estructura similar a los turboprop pero con una conexión más directa con la reductora y genera empuje no sólo para dar sustentación, sino que soporta directamente el peso del vehículo (p.e.: helicóptero). La principal diferencia entre ellos es que la

energía de los gases es utilizada en casi su totalidad para suministrar potencia al eje.

Finalmente, para aplicaciones hipersónicas se utilizan motores **ramjet**, que carecen de compresor y turbina. El aire que entra por la toma a altas velocidades se comprime en una tobera y se lleva directamente a la cámara de combustión desde donde se expulsan los gases a alta presión y temperatura generando el empuje. Cuanto mayor sea la velocidad de la aeronave, mayor será el empuje generado por el motor, generando empuje nulo en reposo. Por ello, es necesario instalarlo en aeronaves con otro tipo de motores que den el empuje a bajas velocidades, o embarcar la aeronave con motor ramjet en otra aeronave que utilice otro tipo de motores, y una vez en vuelo, lanzarla.

2.2. Sistemas de propulsión eléctricos para UAS

Comparado con los sistemas de propulsión de combustible fósil, los **sistemas eléctricos** tienen numerosas ventajas: más respetuosos con el medioambiente (p. ej.: emisión de gases nula), versatilidad en los diseños (p. ej.: multirrotores), variedad de fuentes de energía (pilas de hidrógeno, energía solar, baterías de litio), estructura simple de fácil mantenimiento, entre otras. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes: densidad energética baja de las baterías, resultando en un peso demasiado elevado para cumplir con las necesidades de misión de los UAS o penalizando mucho sus prestaciones (p. ej.: autonomía muy limitada), costes elevados (p. ej.: baterías de litio), insuficiente adaptabilidad a condiciones meteorológicas adversas o en entornos electromagnéticamente complejos.

El sistema de propulsión eléctrica de los UAS generalmente consta de una fuente de energía, un motor eléctrico y un sistema de control. Para el caso de UAS con requisitos exigentes de alcance y tiempo de vuelo, a menudo es necesario emplear un sistema de gestión de energía para lograr una mayor eficiencia de uso. La fuente de energía transmite energía eléctrica al motor y éste hace girar la hélice para generar empuje.

En el caso de los UAS de propulsión eléctrica, la fuente de energía es un componente fundamental que debe tener una alta densidad energética, poco peso y poco ruido, y debe soportar el alcance y autonomía de la misión. Las principales fuentes de energía para los UAS de propulsión eléctrica son las baterías de litio, las pilas de combustible y la energía solar fotovoltaica. Pueden existir configuraciones mixtas: baterías de litio mezcladas con celdas de combustible y baterías de litio mezcladas con energía fotovoltaica.

2.2.1. Pilas de combustible

Una **pila de combustible**⁴ [18] es un dispositivo que convierte la energía química en energía eléctrica. Las que utilizan la energía química del hidrógeno pueden ser empleadas por los UAS y presentan diversas formas: alcalina (AFC), de ácido fosfórico (PAFC), de membrana de intercambio de protones (PEMFC), de ácido sólido (SAFC), de alta temperatura (HTFC) y de almacenamiento eléctrico (ESFC) [19].

Las AFC se distinguen por su estructura simple y su alta eficiencia energética. Sin embargo, tienen un ciclo de vida operativo corto debido a la erosión y tienen impactos medioambientales [19].

Una de las principales ventajas de las **pilas de combustible** de hidrógeno es que utilizan hidrógeno como combustible y aire como oxidante, por lo que sólo generan dos subproductos: agua y aire. En las PAFC, el combustible es hidrógeno y el electrolito, ácido fosfórico líquido [21].

Las PEMFC disponen de dos electrodos: un ánodo y un cátodo, separados por una membrana electrolítica. De este modo, el flujo de electrones se genera suministrando combustible al ánodo y oxidante al cátodo, lo que da lugar a una reacción electroquímica. Pueden mantener una alta eficiencia tanto energética como de densidad de potencia siempre que funcionen a bajas temperaturas [22]. Son la opción preferida para las aplicaciones de vehículos eléctricos debido a su tamaño compacto, su peso ligero y su rica fuente de energía, lo que las convierte en una opción potencial para los drones. En general, las pilas de combustible se caracterizan por una densidad energética significativamente superior a la de las baterías. En un estudio reciente, un dron de ala fija que utilizaba una pila de combustible fue capaz de completar un vuelo de 24 horas [19].

En las pilas de combustible, la densidad de energía y la densidad de potencia del dispositivo de almacenamiento de energía están directamente relacionadas con el alcance, el tiempo de vuelo y el volumen del dron, y por lo tanto tienen un tiempo de uso más prolongado, para el mismo peso, que las baterías de litio. El sistema de propulsión eléctrica del dron con pila de combustible de hidrógeno generalmente comprende un dispositivo de almacenamiento de hidrógeno, una pila de combustible, un regulador electrónico, un motor, una hélice y otros componentes electrónicos de potencia auxiliares.

Las principales ventajas de su uso son: altas densidades de energía y potencia, ausencia de ruido, no contaminación directa y rápido repostaje. Además, al igual que ocurre con los motores de combustión, el peso del dron se reduce gradualmente durante el vuelo, lo que permite prolongar el tiempo de vuelo.

No obstante, los sistemas de propulsión con pila de combustible de hidrógeno no están exentos de inconvenientes, como la pequeña densidad de potencia, la necesidad de que el combustible pase a través de la membrana de intercambio y el tiempo requerido para la reacción electroquímica, las características de voltaje bajo, el riesgo de almacenamiento de hidrógeno, el gran volumen y masa de otros componentes del sistema y el manejo del calor durante la reacción. Estos problemas limitan el uso de la pila de combustible en operaciones UAS.

2.2.2. Baterías

De manera similar a las pilas de combustible, las **baterías** [18] son dispositivos que convierten la energía química en energía eléctrica. Sin embargo, existe una diferencia fundamental entre ambas: mientras que las pilas de combustible requieren un suministro constante de reactivos externos (como hidrógeno o hidrocarburos) para generar electricidad de manera continua, las baterías almacenan la energía en su interior y tienen una capacidad finita, lo que significa que deben recargarse periódicamente.

En los drones de pequeño y mediano tamaño se emplean distintos tipos de baterías, entre ellas: las alcalinas, las de iones de litio (Li-Ion), las de polímeros de litio (Li-Po), las de litio-aire (Li-air), las de litio-azufre (Li-S), las de cloruro de litio-tionilo (Li-SoCl₂), las de plomo-ácido (Pb-acid), las de níquel-cadmio (NiCad), las de hidruro metálico de níquel (NiMH) y las de óxido de zinc (ZnO₂) [23].

Entre todas estas opciones, las baterías Li-Ion y Li-Po [24] son las más utilizadas debido a su bajo coste por unidad, su diseño compacto y ligero, y su capacidad de suministrar una cantidad significativa de energía y potencia en relación con su masa en comparación con otras baterías recargables [25]. Además, las baterías de litio-aire pueden ofrecer una densidad energética entre cinco y diez veces superior a la de las baterías de Li-Ion [26] [27] [28]. No obstante, presentan desventajas, como un número limitado de ciclos de descarga, una recarga más lenta y una mayor susceptibilidad a daños en presencia de humedad. Por otro lado, las baterías de litio-azufre (Li-S) y las de cloruro de litio-tionilo (Li-SoCl₂) destacan por su alta densidad energética por kilogramo [24],

4. En la siguiente referencia se puede consultar una comparativa detallada de los diferentes tipos de pilas de combustible. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/comparison-fuel-cell-technologies-fact-sheet>

aunque las segundas son más costosas en comparación con las baterías de Li-Ion y Li-Po. Se espera que las baterías Li-S sean más asequibles y encuentren un uso más extendido en drones en un futuro próximo.

La selección de la batería más adecuada depende de diversos factores, como: su peso, volumen, densidad de energía y potencia, coste, ciclo de vida, seguridad, mantenimiento y la disponibilidad de técnicas avanzadas de gestión de energía (como monitoreo del estado de salud y carga). La densidad de energía influye directamente en el alcance máximo del dron, mientras que la densidad de potencia afecta su capacidad de aceleración. El ciclo de vida determina la cantidad de veces que una batería puede recargarse antes de perder eficiencia, y tanto su peso como el volumen inciden en la autonomía de vuelo. Además, el coste por unidad juega un papel clave en la viabilidad económica de cada opción.

El uso de baterías en drones es común debido a sus ventajas, como la ausencia de ruido y emisiones contaminantes, la facilidad para reemplazar celdas defectuosas y su conveniente transportabilidad y recarga. Sin embargo, también presentan limitaciones, como un número reducido de ciclos de recarga y una menor densidad energética en comparación con las pilas de combustible y los combustibles sólidos. Por esta razón, las baterías resultan más adecuadas para drones de pequeño y mediano tamaño, especialmente aquellos con requerimientos operacionales que no demanden una gran autonomía de vuelo.

Para optimizar el rendimiento, se pueden emplear sistemas de propulsión híbridos que combinen una pila de combustible con una batería de litio. Este enfoque permite resolver algunos inconvenientes de las pilas de combustible, como su arranque lento y su limitada autonomía inicial. En estos sistemas, la batería proporciona energía durante las fases de despegue, ascenso y descenso del dron, mientras que la pila de combustible se encarga de la propulsión en la fase de crucero, mejorando así la eficiencia del vuelo.

2.2.3. Células solares

Las células solares fotovoltaicas representan una alternativa ecológica para la generación de energía, ya que convierten la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Esta tecnología es una fuente de energía limpia y renovable; sin embargo, su aplicación en drones enfrenta varios desafíos.

Por lo general, los paneles solares se instalan en las alas de drones de ala fija para optimizar la captación de energía. No obstante, su uso en drones pequeños es limitado debido a la gran superficie requerida para generar una cantidad suficiente de electricidad. Además, su eficiencia depende de la exposición directa a la luz solar, lo que representa una desventaja en condiciones de baja iluminación o en ausencia de sol. Si bien los paneles solares eliminan la necesidad de combustible y reducen la frecuencia de recargas, su integración conlleva costos iniciales elevados y requiere sistemas de soporte adicionales, lo que incrementa el peso del dron y puede afectar su rendimiento.

En el Capítulo 6 se profundizará en su aplicación en los HAPS (High Altitude Platform System).

2.3. Sistemas de propulsión híbridos

Los problemas de sostenibilidad económica y medioambiental de los combustibles fósiles, junto a las limitaciones de densidad de energía de las baterías y, por ende, de autonomía/alcance, han llevado a idear soluciones híbridas, acoplando motores de combustión con motores y baterías eléctricas. Con carácter general, se pueden clasificar en instalaciones híbridas en serie, en paralelo y mixtas.

En los **sistemas de propulsión híbridos en paralelo** el motor de combustión y el eléctrico mueven la hélice a través de un mecanismo de accionamiento mecánico al que están acoplados los ejes de rotación de ambos motores. Cuando el motor de combustión produce más potencia de la necesaria, el exceso de potencia se convierte en potencia eléctrica a través de un generador y se almacena en una batería. Cuando la potencia suministrada es escasa, la energía eléctrica almacenada activa el motor eléctrico para compensar el déficit de potencia del motor de combustión. Un sistema de gestión de energía controla el proceso optimizando el consumo de energía dentro de la envolvente de vuelo del UAS, reduciendo el consumo de combustible (con respecto al motor de combustión aislado) y aumentando la autonomía del UAS (con respecto al motor eléctrico aislado).

En los **sistemas de propulsión híbridos en serie** el motor de combustión actúa directamente sobre el generador, y este a su vez mueve el motor eléctrico con la potencia del primero, o en su caso, con la suministrada por una batería que también alimenta el motor eléctrico cuando el motor de combustión no suministra toda la potencia necesaria. En los casos en que la potencia suministrada por el motor de combustión excede la necesaria para el motor eléctrico, el exceso es almacenado en la batería a través del generador.

Nuevamente se consiguen ahorros de combustible y aumento de la autonomía del UAS, utilizándose el motor eléctrico principalmente para el arranque y el aterrizaje, y el motor de combustión para la fase de crucero. Al recibir la hélice la potencia directamente del motor eléctrico, esta solución híbrida permite sistemas de potencia distribuidos.

En los **sistemas de propulsión híbridos mixtos**, la configuración es una combinación de los híbridos en serie y en paralelo. La energía mecánica generada por el motor se transfiere en parte a la hélice a través de un acoplador mecánico, mientras que el generador genera la otra parte para que el motor eléctrico gire o se almacena en la batería. Durante el vuelo, el motor eléctrico y el motor de combustión, juntos, proporcionan energía para generar el empuje. Cuando el UAS está operando a baja velocidad, el sistema de energía híbrido funciona principalmente en forma de serie. Cuando vuela a altas velocidades, el sistema funciona en paralelo. Además, cuando el dron está en modo de frenado, el generador genera energía eléctrica y la almacena en la batería.

3. PRESTACIONES

Las **prestaciones** de un UAS pueden definirse como las capacidades operativas y técnicas que determinan tanto su eficiencia como alcance en una misión específica. Estas prestaciones son el resultado de diferentes parámetros clave, como es caso del tamaño del UAS, su peso o MTOW (Maximum Take Off Weight), la velocidad máxima, la carga útil o de pago, y la autonomía del mismo. Estas determinarán cómo un UAS interactúa con el entorno y cumple con los objetivos para los que fue diseñado.

Todos estos parámetros interactúan de manera compleja, por lo que la optimización de cualquiera de ellos puede comprometer al resto, generando inevitables compromisos tanto en el diseño como en la operación. Aunque esta versatilidad permite adaptar los UAS a una amplia gama de aplicaciones y necesidades, también plantea importantes desafíos tecnológicos.

En el presente apartado se profundizará en el análisis cuantitativo de diferentes variables mediante la presentación de datos recopilados de diversos modelos con un **peso inferior a 100 lb**. Estos datos serán representados gráficamente en formato de nube de puntos para facilitar su interpretación y comparación [5]⁵.

Es importante destacar que, aunque este capítulo se centra exclusivamente en drones pequeños y medianos, los vehículos aéreos no tripulados de mayor tamaño destinados a la UAM (Urban Air Mobility) serán analizados en detalle en el Capítulo 5, mientras que los HAPS (High Altitude Platform System) tendrán su correspondiente tratamiento en el Capítulo 6.

En primer lugar, la **relación entre el tamaño y el MTOW** en los UAS revela diferencias significativas entre las distintas configuraciones. En la siguiente Ilustración se puede observar cómo esta relación es mayor para UAS de ala fija y híbridos (quadplane/tiltrotor) ya que requieren de una mayor superficie alar para generar sustentación eficiente.

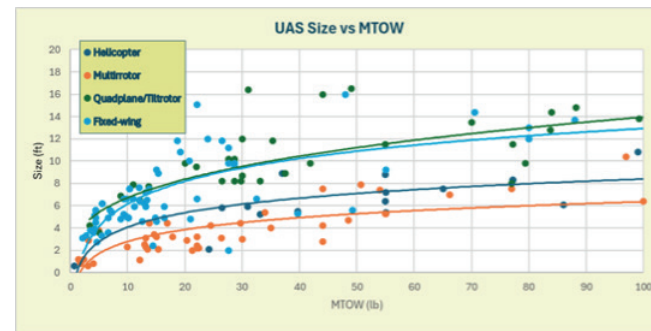


Ilustración 11. Tamaño UAS vs MTOW

De esta forma, estos UAS requieren alas grandes o configuraciones híbridas que optimicen el rendimiento aerodinámico, lo que incrementa su tamaño en comparación con su peso. Por el contrario, en el caso de helicópteros y multirrotores, suelen presentar una relación más baja entre tamaño y MTOW debido a la naturaleza de su sistema de propulsión, que permite el despegue y aterrizaje vertical sin depender de una gran superficie alar, pero presentando un mayor peso estructural.

Respecto a la **relación entre la autonomía y peso**, en la siguiente Ilustración se puede comprobar que los UAS de ala fija son los que presentan las mejores características en cuanto a autonomía, al estar diseñados específicamente para minimizar la resistencia aerodinámica y maximizar el tiempo de vuelo, alcanzando valores más elevados de la misma, a igualdad de peso, que para otras categorías.

Los UAS híbridos ocupan una situación intermedia, ya que estos vehículos combinan las ventajas del vuelo VTOL con la eficiencia aerodinámica del vuelo de ala fija, observándose mejoras mínimas en la autonomía al incrementar su MTOW. Por el contrario, los helicópteros y multirrotores presentan una autonomía mucho más limitada por su naturaleza estructural y de su sistema de propulsión, mostrando escasas mejoras en la misma al aumentar el MTOW y resultando en una tendencia prácticamente asintótica.

5. Cabe destacar que 9 de las aeronaves consideradas en el estudio son españolas suponiendo un 4,8 % del total.

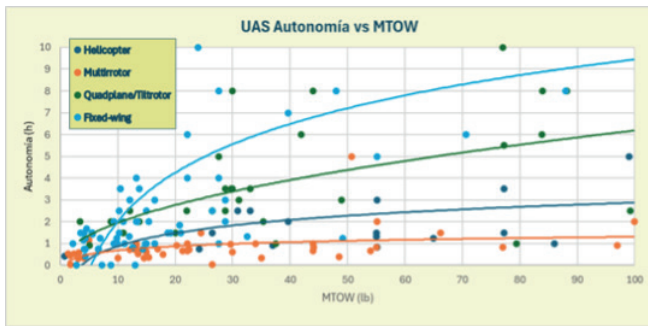


Ilustración 12. Autonomía UAS vs MTOW

Comparando la **velocidad frente al MTOW**, en la siguiente Ilustración se observa que los UAS de ala fija y los híbridos presentan las mayores velocidades, debido a su diseño aerodinámico.

Los helicópteros presentan velocidades máximas menores debido a limitaciones inherentes de su diseño, como la resistencia inducida por los rotores principales y la pérdida de eficiencia a altas velocidades.

Por último, los multirrotores, en general, debido a que su diseño está enfocado a la maniobrabilidad y estabilidad hace que, en general, no se observen grandes incrementos de velocidad al incrementar su peso, salvo para ciertos modelos correspondientes a configuraciones más pesadas (100lb), que pueden presentar motores híbridos más potentes, aumentando la relación velocidad/MTOW (este sería el caso del modelo X-5B *Huntress*).

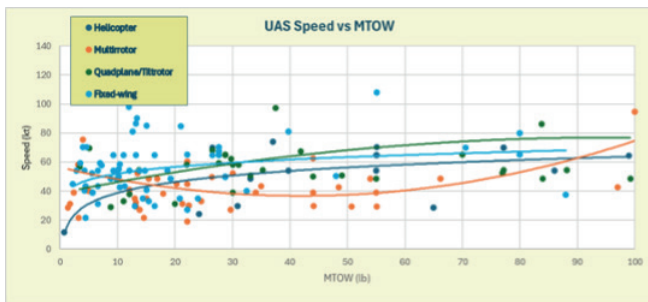


Ilustración 13. Velocidad UAS vs MTOW

Finalmente, se analiza la **relación entre carga de pago (PLD) y MTOW frente al MTOW** del UAS. Los UAS híbridos combinan características de VTOL y vuelo de ala fija, lo que añade complejidad mecánica y estructural. En rangos de MTOW bajos (inferiores a 100lb), esta complejidad puede penalizar la relación PLD/MTOW.

Aunque los UAS de ala fija son los más eficientes en términos absolutos, en rangos de MTOW bajos (inferiores a 100 lb),

su diseño aerodinámico optimizado puede ser excesivo para las cargas útiles típicas. Las alas y estructuras necesarias para generar sustentación eficiente en vuelo horizontal ocupan una proporción significativa del MTOW, reduciendo la relación PLD/MTOW.

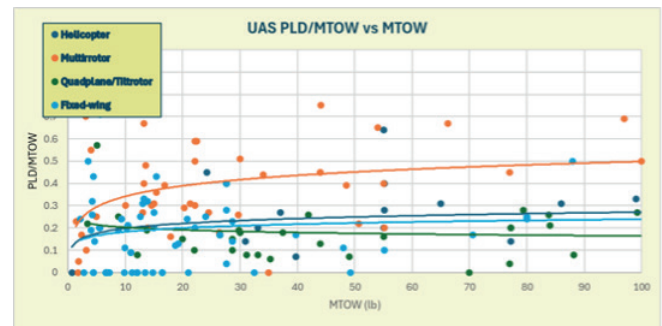


Ilustración 14. UAS PLD/MTOW vs MTOW

En el caso de los helicópteros, se requieren sistemas de rotor principal y de cola, así como mecanismos de control colectivo y cíclico, añadiendo peso adicional y dejando menos capacidad para carga útil.

Los multirrotores son los que presentan una mejor relación entre carga útil y peso, al no requerir sistemas complejos como rotores articulados o superficies de control aerodinámicas, reduciendo el peso estructural y haciéndolos óptimos para el transporte de carga útil, como podría ser el caso de cámaras para fotografía o inspección.

4. SISTEMA DE COMUNICACIONES, MANDO Y CONTROL (C3)

Los UAS son sistemas que fundamentalmente se componen de tres elementos: un vehículo aéreo, una estación de tierra y los enlaces de comunicaciones que conectan ambos. **La ausencia de un piloto a bordo implica la necesidad de desarrollar sistemas de comunicaciones robustos, efectivos y seguros** para, como mínimo, garantizar el control de la aeronave desde tierra. Sin embargo, también surgen nuevas operaciones de UAS que requieren comunicaciones con otros UAS (caso de los enjambres), con aeronaves tripuladas o incluso con los servicios de tránsito aéreo.

Cabe destacar que estos enlaces estarán limitados por o serán dependientes de las características del vehículo, las funciones requeridas por la normativa vigente, la misión a llevar a cabo y el entorno de operación. Además, el hecho de coexistir varios enlaces de comunicaciones, en ocasiones en bandas de frecuencias iguales o cercanas,

requerirá contemplar el riesgo de posibles interferencias entre ellos, siendo necesario un estudio de compatibilidad electromagnética, tal como indica la metodología SORA. A continuación, se hará una breve introducción a los distintos enlaces de comunicaciones necesarios, tanto sobre sus características físicas como sobre los equipos asociados a estos.

4.1. Componentes y funcionamiento

El sistema de comunicaciones de un UAS, por su naturaleza, se compone de elementos en tierra y embarcados, que incluyen:

- **Estación de tierra:** Ubicación desde la cual el operador (piloto) controla el dron y que cuenta con una consola de control. Es el centro de comando desde el cual se envían instrucciones al dron y se reciben datos.
- **Antena:** Componente encargado de transmitir y recibir las señales entre la estación terrestre y el dron, siendo un elemento clave para establecer una conexión sólida y estable entre ambos.
- **Transmisor:** Dispositivo que recoge la señal de la estación terrestre y la convierte en señales de radiofrecuencia para enviar al dron, utilizando una determinada frecuencia de operación.
- **Receptor:** Dispositivo ubicado en el dron que recibe las señales de radiofrecuencia enviadas por el transmisor, las decodifica y asegura que las órdenes del operador se interpreten correctamente.

De esta forma, y de manera simplificada, el funcionamiento sería el siguiente: cuando el operador acciona un comando en la estación terrestre, el transmisor envía la señal al dron a través de la antena en forma de ondas de radio (o bien utilizando satélites como se explicará posteriormente). El receptor recibe la señal, la decodifica y la ejecuta, si es una señal de control, de manera que el dron se moverá según lo instruido por el operador. A su vez, al tratarse de un enlace bidireccional, el operador recibirá datos del dron.

4.2. Objetivos de los sistemas de comunicaciones en un UAS

Desde un punto de vista funcional [6], los sistemas de comunicaciones disponibles en el UAS tienen cuatro objetivos diferentes:

Proporcionar/recibir información en tiempo real en la estación de tierra de:

1. Los parámetros más relevantes del vuelo (telemetría): la posición (latitud, longitud, altitud) de la aeronave, su actitud, el estado de los sistemas embarcados, alarmas, estado de la batería, etc.
2. Las imágenes, vídeos y metadatos de valor añadido capturados y enviados desde el sensor ubicado en la aeronave durante la ejecución del vuelo y que se utilizan para la toma de decisiones en tierra, ya sea en un plano táctico o estratégico.

Enviar comandos hacia la aeronave por parte del:

3. Piloto para modificar aspectos relacionados con el plan de vuelo.
4. Operador de carga de pago para modificar configuraciones, apuntamientos, etc., de los sensores embarcados.

4.3. Arquitectura de los enlaces

A la hora de analizar el sistema de mando y control, se distinguen dos arquitecturas diferentes [7]:

- **RLOS** (*Radio Line Of Sight*, alcance visual de radio), referido a la situación en la que tanto el transmisor como el receptor están en cobertura de radio, por lo que el contacto se puede llevar a cabo directamente a través de un enlace de radio, ya sea UHF o VHF.

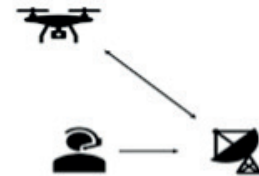


Ilustración 15. Arquitectura RLOS

Este tipo de arquitectura presenta una cobertura y un alcance limitados. La ventaja radica en que el retardo del enlace radioeléctrico es bajo en comparación con otras arquitecturas, en las que es necesario ampliar la red de comunicación mediante estaciones de retransmisión intermedias que introducen retardos adicionales y aumentan la probabilidad de fallo de los equipos y de pérdida de comunicación de los datos. Por tanto, arquitectura especialmente indicada para situaciones operacionalmente complejas, que requieran de baja latencia y tiempos de reacción rápidos entre los actores.

- **BRLOS** (*Beyond RLOS*, Mas allá de alcance visual de radio), referido a cualquier configuración en la que los transmisores y receptores no están en RLOS. Como las operaciones RLOS están limitadas por la cobertura y el alcance, en ocasiones, no existe un grupo de estaciones terrestres en red que proporcione una cobertura eficaz, por lo que se requiere un enlace de comunicaciones por satélite. Por lo tanto, BRLOS incluye el uso de servicios por satélite como Inmarsat o Iridium. Los sistemas por satélite permiten una mayor cobertura en situaciones en las que las distancias entre el UAS y la estación remota son mayores.

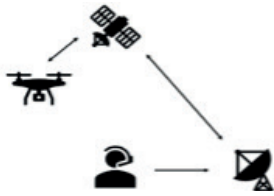


Ilustración 16. Arquitectura BRLOS

En ambos casos, RLOS y BRLOS, las señales se retransmiten en diversas frecuencias y modulaciones, de manera que se puedan adaptar las condiciones de operación, evitar interferencias y reducir el tamaño de los equipos embarcados

4.4. Enlace de mando y control

A la hora de categorizar los enlaces según su uso, en primer lugar, y más importante, tenemos **el enlace de mando y control (Command and Control, también conocido como C2)**. Este enlace es el que permite controlar el vuelo de la aeronave desde tierra, dando órdenes a través de la radiofrecuencia para modificar tanto las características críticas del vuelo (como pueden ser la altitud y la velocidad), como el envío de otros comandos al dron, (p.ej, el centrado o control de la plataforma giro-estabilizada de cámara o cualquier otra carga de pago).

En lo que respecta a la carga de pago, esta puede contar con su propio enlace de comunicaciones como se verá más adelante. En general, este enlace deberá ser un enlace de comunicaciones bidireccional y seguro, ya que soporta las señales críticas para la seguridad de la aeronave.

4.4.1. Desafíos técnicos del sistema de mando y control

El sistema de mando y control es fundamental para garantizar el vuelo seguro de los drones, por lo que a continuación se destacan algunas cuestiones fundamentales a tener en cuenta:

- **Latencia:** El tiempo de demora que existe entre el envío y la recepción de un mensaje o dato, es un factor crítico en el enlace de comunicaciones, especialmente en entornos con altas densidades de tráfico, como sería el caso de un entorno urbano, de forma que puede influir sustancialmente en la capacidad de respuesta y, por consiguiente, en la seguridad. Este problema es una limitación importante, principalmente en arquitecturas BRLOS, donde la transmisión no puede completarse en plazos comparables a arquitecturas RLOS.
- **Ancho de banda:** La transmisión de datos entre el dron y la estación terrestre requiere un ancho de banda adecuado que pueda cubrir las necesidades de la operación. Además, en entornos donde se espera que múltiples drones operen simultáneamente, la combinación de las diversas transmisiones de datos puede llevar a una saturación del espectro radioeléctrico.
- **Interoperabilidad:** En el entorno de operación de los drones se espera que puedan coexistir múltiples proveedores de servicios, así como drones de características muy dispares, por lo que es fundamental que el sistema de mando y control sea interoperable entre sistemas de diferentes fabricantes y proveedores de servicios.
- **Resistencia a las interferencias y pérdidas:** Estos sistemas deben ser capaces de resistir interferencias externas, ya sean causadas por fuentes naturales, como tormentas eléctricas, o sean generadas de forma intencionada. En el caso de la arquitectura BRLOS, las comunicaciones por satélite sufren pérdidas de propagación causadas por características ambientales, como las pérdidas atmosféricas o la absorción de la señal, mientras que la arquitectura RLOS se puede ver afectada por la presencia de obstáculos.

4.5. Avances recientes y perspectivas futuras

En la actualidad se está trabajando en diversos avances para mejorar la tecnología del sistema de mando y control de los drones. Las redes de comunicación jugarán un papel crucial en el futuro del enlace C2, por lo que la integración de las tecnologías 5G es uno de los aspectos que actualmente se encuentran bajo estudio, como es el caso de los llevados a cabo por proyectos europeos como **5G!Drones**, (*H2020-ICT-2018-2020, Unmanned Aerial Vehicle Vertical Applications' Trials Leveraging Advanced 5G Facilities*), o **5GENESIS** (*H2020-ICT-815178, 5th Generation End-to-End network, Experimentation, System Integration,*

and Showcasing). La tecnología 5G presenta una muy baja latencia, altas capacidades de transmisión de datos, así como una conectividad con gran estabilidad, lo que la convierte en idónea para operaciones tanto en entornos urbanos como en lugares remotos y fuera de la línea de visión.

Por otra parte, el proyecto **DroC2om** (SESAR 2020, *Drone Critical Communications*) propone la combinación del 5G junto con las redes por satélite ya existentes para operaciones en VLL (Very Low Level, inferiores a 500 ft). Este proyecto considera que la integración híbrida presenta lo mejor de ambos mundos: la baja latencia y la cobertura de una zona amplia de las redes celulares, junto con la alta fiabilidad y disponibilidad de las comunicaciones por satélite.

Además del uso de la tecnología 5G, se está considerando el empleo de la inteligencia artificial (IA) para la mejora de la eficiencia y efectividad de los sistemas de mando y control futuros. Por un lado, la IA permite ajustar parámetros de medición y coordinar sensores para mejorar la adaptación a las necesidades de cada misión y cambios ambientales; por otro lado, puede ayudar a la toma de decisiones, reduciendo así la carga de trabajo y ayudando en la evaluación de diversas situaciones. Por último, ésta puede servir de ayuda para la presentación de información al piloto, detectando y mostrando la presencia de otras aeronaves u obstáculos fijos.

4.6. Enlaces de telemetría

Si el enlace de mando y control permite al piloto remoto dirigir la aeronave, los enlaces de telemetría permiten a la aeronave informar al piloto/estación de control en tierra sobre el estado de la misma, transmitiendo, en tiempo real datos vitales como altitud, velocidad, posición GPS, estado de la batería y otros parámetros de vuelo o del vehículo.

Por lo general, el enlace de telemetría irá unido al de mando y control, conformando un enlace bidireccional (en UHF o VHF, con posible respaldo vía satelital). Estos enlaces operan a través de diferentes frecuencias de radio, comúnmente en las bandas de 900 MHz, 2.4 GHz y 5.8 GHz, dependiendo de la distancia y el entorno operativo.

4.7. Enlace de carga de pago

Los UAS de grandes dimensiones y prestaciones, con sensores de carga de pago avanzados, es posible que dispongan de su propio enlace de comunicaciones, adicional al enlace del vehículo. Esto es especialmente útil cuando los equipos transportados, y estabilizados giroscópicamente, requieren hacer uso de una gran cantidad de datos, como

la retransmisión de video en calidad 4K u otros sensores electroópticos de alta definición.

Por otro lado, algunas cargas de pago activas, como los sistemas de pulverización utilizados en agricultura, necesitan que el operador remoto pueda controlar directamente su funcionamiento, a través de la activación o desactivación de actuadores.

La principal ventaja de estos enlaces de comunicaciones para carga útil es que pueden ser gestionados por un operador independiente, permitiendo que el piloto del UAS se concentre en el vuelo. Además, al contar con un enlace separado, se evita cualquier interferencia que pueda comprometer la seguridad de la operación.

4.8. Enlace para terminación del vuelo

El enlace para terminación de vuelo (FTS) [8] es una de las novedades normativas en el marco EASA. Su función principal es mitigar riesgos durante el vuelo ante situaciones de emergencia, como la pérdida del enlace C2. Para vehículos con marcado de clase C5 y C6, y ante la posibilidad de pérdida del enlace C2, será obligatorio, en ciertos escenarios de operación en categoría específica, disponer de sistemas de respaldo que permitan finalizar el vuelo de manera segura.

Los sistemas de enlace para terminación de vuelo comparten ciertas características con los utilizados para el enlace C2, especialmente en lo que respecta a emisores, receptores y enlaces radioeléctricos. Sin embargo, deben estar físicamente separados del sistema de mando y control para garantizar redundancia y seguridad.

Generalmente, se recomienda el uso de equipos redundantes y, preferiblemente, otra banda de frecuencias. En caso de emplear bandas de frecuencia de telefonía móvil tanto para el enlace C2 como para FTS, es aconsejable utilizar proveedores distintos para cada sistema, minimizando así el riesgo de fallos simultáneos.

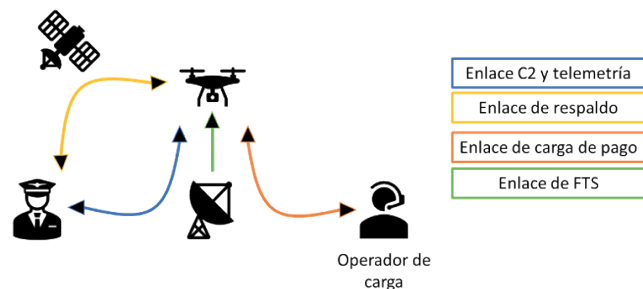


Ilustración 17. Resumen Enlaces de comunicaciones UAS

5. SISTEMA DE NAVEGACIÓN

Las plataformas UAS de uso civil, especialmente las de configuración multirrotor, son capaces de operar con movimiento de 6 grados de libertad (traslación en tres ejes perpendiculares: movimientos de guiñada, cabeceo y alabeo) de rápida evolución en entornos complejos, como son los entornos urbanos, el interior de edificaciones o en las proximidades de personas. Por tanto, surge la **necesidad de determinar con precisión la posición y orientación de la aeronave**, a fin de que el piloto (remoto o autopiloto) ejecute las maniobras necesarias para adherirse a su ruta.

El desarrollo de sistemas de navegación avanzados es especialmente relevante en las operaciones UAS actuales, ya que estas suelen llevarse a cabo en volúmenes de espacio aéreo delimitados y, en algunos casos, completamente segregados del tráfico aéreo convencional. En este contexto han surgido nuevos requisitos como el *geofencing* o *geocaging*, que buscan restringir automáticamente el área permitida al vuelo de los drones mediante software u otros sistemas. Estas tecnologías requieren conocer la posición del vehículo en relación con las de zonas restringidas o prohibidas, garantizando un vuelo seguro y conforme a la normativa/reglas/limitaciones impuestas.

A diferencia del mundo de la aviación civil convencional, donde existe una extensa red de infraestructura de radioayudas para asistir a la navegación, **los vehículos UAS civiles dependen fundamentalmente de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) y de la navegación mediante sistemas inerciales (INS) [9]**. Este apartado, por lo tanto, se centrará en estas dos tecnologías complementarias que componen una parte importante de los sensores de navegación actuales, para después introducir otro tipo de equipamiento comercial y en desarrollo para cubrir las limitaciones de éstos, como puede ser la navegación por visión o el uso de enlaces 5G.

5.1. Sistemas inerciales (INS)

Debido a las limitadas capacidades y tamaños de los UAS utilizados con fines civiles actualmente, una de las tecnologías clave para la Navegación son los sensores microelectromecánicos (MEMS). Es cierto que este tipo de sensores proporcionan bajo rendimiento en comparación con otras alternativas, pero a cambio, ofrecen un coste y dimensiones muy reducidos. En concreto, es muy común encontrar pequeñas IMU (Inertial Measuring Unit) que integran acelerómetros, giróscopos e incluso magnetómetros

y permiten estimar con relativa precisión la orientación de un vehículo. Un ejemplo significativo es la MPU-6050 de Invensense, un pequeño chip con interfaz I2C que incluye 3 acelerómetros y 3 giróscopos, y puede ser integrado con otros sensores (p. ej., magnetómetros o sensores de presión)

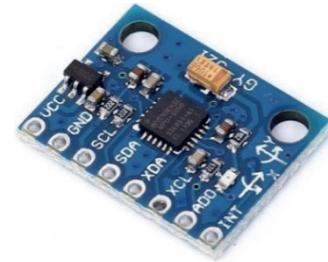


Ilustración 18. IMU modelo GY-521 basada en el chip MPU-6050

Sin embargo, las limitaciones de este tipo de sistemas, en lo que respecta a precisión, características de ruido (que supondrá errores de medición) y deriva (error creciente en el tiempo debido a la integración de los errores de medición), hacen que no sean suficientes, por sí solos, para estimar la posición en tiempo real. Los errores mencionados se deben, en primer lugar, a que estos sensores son sensibles a factores ambientales, como la temperatura, así como a las interferencias electromagnéticas, especialmente en entornos urbanos o industriales, donde la intensidad de señales radioeléctricas puede perjudicar su rendimiento.

En conclusión, las características de los sensores MEMS los hacen inviables como solución de navegación completa. Sin embargo, cuando se combinan con un procesador de datos, pueden conformar un sistema de referencia de actitud y rumbo (AHRS, por sus siglas en inglés) confiable para aeronaves operadas en VLOS. Esto permite un vuelo más intuitivo y sencillo al proporcionar información clave al sistema de control de vuelo.

5.2. Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS)

Por otro lado, los sensores GNSS [10] son capaces de determinar con gran precisión la posición en tiempo real de la aeronave, en cualquier parte del mundo, utilizando distintas constelaciones satelitales, como pueden ser el GPS (EE.UU.), el GLONASS (Rusia) o Galileo (UE). Estos sistemas satelitales emiten señales con su posición y la hora exacta de transmisión, de manera que un receptor puede calcular la distancia a cada satélite y, triangulando la posición relativa (al menos a cuatro satélites), es capaz de determinar su posición con precisión.

Hoy en día, esta tecnología también se ha miniaturizado, con equipos tan pequeños como el TinyGPS de NamelessRC, lo cual permite tener funcionalidades GNSS en cualquier vehículo.



Ilustración 19. Dispositivo TinyGPS

5.3. Fusión de sensores

Para poder aprovechar al máximo las capacidades de los sensores, reducir el efecto del ruido y aumentar la resiliencia ante contingencias e interferencias, es posible utilizar diversos algoritmos que integran señales de varios sensores. Esto se conoce como fusión de sensores, siendo los filtros Kalman los más utilizados⁶. La siguiente ilustración muestra el esquema de uso de un filtro Kalman.

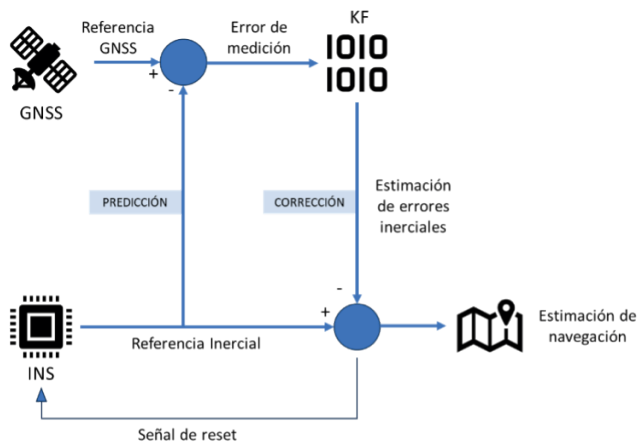


Ilustración 20. Diagrama flujo filtro Kalman

Por este motivo, es común encontrar sensores GNSS junto a una IMU tipo MEMS en plataformas UAS civiles. Estos sensores integrados, mediante un algoritmo de

6. El filtro Kalman es un algoritmo que permite estimar el estado real (no medible) de un sistema dinámico a partir de una serie de mediciones observables que pueden contener ruido, errores u otras incertidumbres. Para ello, el algoritmo funciona en dos pasos. En el primero, la predicción, se estima el estado proyectando a futuro el estado actual, después, compara esta predicción con unas medidas de referencia, lo que permite estimar el error y con ello corregir la predicción inicial. De esta manera se minimiza el error en la estimación de navegación final.

fusión (el filtro de Kalman sería un ejemplo), permiten una retroalimentación efectiva de los sensores inerciales, reduciendo la incertidumbre causada por las imprecisiones de dichos sensores inerciales y los problemas de continuidad de las señales GNSS. Este tipo de equipos de navegación (IMU+GNSS) proporcionan una ubicación precisa y en tiempo real, y funciones de navegación autónoma de seguridad como retorno a base (conocido por sus siglas en inglés RTH), que permite a la aeronave regresar al punto de partida en caso de pérdida de comunicaciones con el piloto remoto. En muchos casos, estos sensores y la lógica interna se venden integrados en módulos de navegación completos para operar con distintos modelos de UAS.

La solución mencionada en el párrafo anterior es óptima para la navegación en exteriores con plena cobertura GNSS. Sin embargo, para navegación en interiores o en zonas con baja cobertura GNSS o expuestas a interferencias jamming o spoofing, cuando la misión se realice en automático o BVLOS, es necesario acudir a sistemas no dependientes de señales externas.

5.4. Otros sistemas de navegación

Una de las soluciones para vuelos en interiores o zonas cubiertas con problemas de cobertura GNSS, es lo que se conoce como Mapeo y Localización Simultáneos (SLAM), proceso por el cual una plataforma móvil utiliza sensores para detectar el terreno circundante (sensores electroópticos, LiDAR, Light Detection And Ranging, o radar, por ejemplo), a la vez que utiliza sensores inerciales para detectar su propio movimiento. De esta manera, puede mapear las características de su entorno y su movimiento y posición relativos al mismo. Es especialmente útil para tareas de mapeo topográfico.

Sin embargo, la tarea de procesamiento de imágenes y datos de terreno asociada a SLAM puede verse limitada por la capacidad de computación disponible en UAS pequeños. Es por esto que se está estudiando la posibilidad de utilizar técnicas de “edge computing” en redes 5G para realizar el procesamiento de datos remotamente y transmitir a través de estas mismas redes toda la información de navegación que necesita el controlador de vuelo del UAS. Esto es especialmente relevante en el caso de drones completamente autónomos o enjambres, en los que la comunicación entre ellos es vital para coordinarse y mantener la separación apropiada.

Asimismo, el uso de tecnología 5G permite, por ejemplo, beneficiarse de sensores RTK (Real Time Kinematic)

avanzados, ubicados en una estación de tierra, desde la que se emite una señal de referencia basada en GNSS a través de la red 5G, consiguiendo un posicionamiento preciso del UAS sin necesidad de alta carga computacional o sensores embarcados.

6. SISTEMA DE VIGILANCIA

6.1. Introducción a los sistemas de vigilancia de la aviación convencional

En el contexto de la aviación tradicional, la vigilancia es el término comúnmente utilizado en el control de tránsito aéreo para referirse al proceso mediante el cual se conoce la posición de las aeronaves desde tierra. A tal fin se dispone de los procesos y sistemas necesarios para vigilar y realizar un seguimiento de las aeronaves. Se materializa con la recogida, el tratamiento y la distribución de datos (en tiempo real) sobre la posición, los movimientos y la identificación de las aeronaves.

Los sistemas de vigilancia usados para la aviación tripulada son: radar primario o secundario, radar Modo S, ADS-B y MLAT. Para la aviación general, planeadores, aviones ligeros y helicópteros de emergencias (HEMS), también se puede añadir UAT⁷ o el FLARM (Flight Alarm) como sistema de concienciación del tráfico y previsión de colisiones. A corto plazo es posible que se empleen, de forma limitada, estos métodos tradicionales de vigilancia a los drones de mediano y pequeño tamaño (salvo el radar primario, por contar estos con una superficie insuficiente para reflejar las ondas de radio y por volar a bajas altitudes y en entornos urbanos donde el radar no es eficiente).

Sin embargo, en el medio plazo, los sistemas mencionados no supondrán un método útil y sostenible por los siguientes motivos [11]:

Limitaciones de capacidad y saturación del espectro

- Tanto **ADS-B ES1090, como SSR Modo-S y MLAT** operan en la frecuencia de **1090 MHz**, la cual ya está **saturada en muchas regiones** debido al alto volumen de tráfico de la aviación tripulada.
- La cantidad de direcciones únicas disponibles en **Mode-S (16 millones)** es insuficiente para la enorme cantidad de drones que se espera integrar en U-Space.

Problemas de seguridad y autenticación

- **ADS-B y Mode-S** transmiten información sin cifrar y sin autenticación, lo que los hace vulnerables a ataques como **spoofing (falsificación de señales)**.
- Los drones podrían generar transmisiones falsas o ser víctimas de ataques que interfieran con su operación segura.

Incompatibilidad con el tamaño y características de los drones

- **ADS-B está diseñado para aviones grandes** (MTOM > 5700 kg o velocidad > 250 KTAS), mientras que los drones objeto de este cuaderno son significativamente más pequeños y más lentos.
- Implementar estos sistemas en drones pequeños sería **costoso, ineficiente y excesivo** en términos de hardware y consumo energético.

Dependencia de la infraestructura existente (pensada para aviones tripulados)

- La **multilateración a gran escala (WAM) y el radar secundario (Mode-S SSR)** dependen de estaciones terrestres diseñadas para monitorear aeronaves tripuladas en el espacio aéreo controlado.
- Los drones operan a **baja altitud y en entornos urbanos**, donde esta infraestructura no es eficiente ni viable.

Limitaciones del sistema FLARM

- FLARM es una **tecnología propietaria** utilizada en aviación general, pero no está diseñada para manejar el **alto volumen de tráfico** que se espera en U-Space.
- Además, su interoperabilidad con otros sistemas de vigilancia no está garantizada.

7. Sistema ADS-B en frecuencia 978MHz, empleado en EEUU para la aviación general. Más económico que el estándar ADS-B ES1090, pero no son compatibles, por lo que requiere de estaciones en tierra (TIS) que retransmitan la información de posición de los tráficos equipados con ambos sistemas. En marzo de 2025, la CAA-UK publicó una enmienda a la CAP1391 para permitir el uso de la frecuencia UAT 978MHz a bordo de UAS.

6.2. Sistemas de vigilancia para UAS civiles

Por todo lo anterior, en el caso de la **aviación no tripulada de mediano y pequeño tamaño**, hay que considerar medios alternativos de vigilancia y seguimiento. Por un lado, serán los sistemas colaborativos embarcados en los propios UAS (emisión de su **identificación**, comparable al ADS-B de la aviación convencional); y, por otro lado, los sistemas utilizados para rastrear la posición de los UAS desde tierra (**detección**).

En 2019 [12], la normativa europea (Reglamento Delegado (UE) 2019/945) estableció que todos los UAS de más de 250 g deben disponer de los medios para proporcionar la funcionalidad de **identificación a distancia directa (DRI)**⁸, siendo una especie de matrícula digital para los UAS, en vigor a partir del 1 de enero de 2024⁹. En particular, los drones estarán en disposición de transmitir de forma periódica una señal de difusión que pueda ser recibida directamente por los dispositivos móviles dentro de su alcance. La transmisión consistirá en un número de serie único proporcionado por el fabricante del UAS, un número de registro del operador del UAS, su posición geográfica y la altura, la dirección y la velocidad del dron, su estado de emergencia y la posición geográfica del operador. Una modificación posterior de la norma (Reglamento (UE) 2020/1058) introdujo la identificación a distancia de red opcional, transmitiendo la misma información que en la identificación remota directa.

Existe una regulación similar en EEUU, que promulga la necesidad de transmitir identificación remota de los UAS por difusión [13]. Los UAS deben transmitir (ellos mismos o mediante un módulo de difusión de identificación remota) la siguiente información: identificación del UAS, latitud/longitud, altitud y velocidad del UAS, latitud/longitud y altitud de la estación de control, estado de emergencia y una marca de tiempo. Esta transmisión debe realizarse utilizando un protocolo compatible con los dispositivos inalámbricos personales existentes. Contrariamente a las regulaciones europeas, la identificación a distancia basada en red no se considera. Además, la norma estadounidense también prohíbe el uso de ADS-B como medio para cumplir con los requisitos de identificación remota, ya que su uso está limitado (se requiere de autorización previa) a UAS grandes que operen en espacio aéreo controlado.

8. "identificación directa a distancia": un sistema que garantiza la difusión local de información sobre una aeronave no tripulada en operación, incluido el marcado de la aeronave no tripulada, de modo que esta información pueda obtenerse sin acceso físico a la aeronave no tripulada.

9. <https://www.seguridadaaerea.gob.es/en/noticias/en-2024-entra-en-vigor-el-marcado-de-clase-de-dronesuas-y-la-identificacion-distancia>

10. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-4709-002-2023-n0072047>

Las regulaciones anteriores impulsan la necesidad de desarrollar protocolos de transmisión de difusión abiertos y estandarizados, que puedan ser recibidos utilizando dispositivos móviles, esto es, que la información que los drones transmiten sobre su identidad y posición debería poder ser captada fácilmente por teléfonos inteligentes y otros dispositivos comunes, sin necesidad de equipos especiales. Esto limita las posibilidades principalmente a Wi-Fi, Bluetooth o las redes de telefonía móvil 4G/5G. Por ejemplo, un sistema de identificación remota puede consistir en una SIM asociada a un dron, de manera que este quede unívocamente registrado a través de un operador de telefonía móvil.

En la fecha de elaboración de este cuaderno, si bien ya existen propuestas de estándares como el ASTM F3411-19 (EEUU) y el prEN 4709-002¹⁰ (Europa), **aún no se ha adoptado un protocolo uniforme a nivel global**, por lo que cada proveedor de UTM/U-Space puede definir sus propios modelos de datos e interacciones. Como consecuencia, este enfoque exige que el dispositivo conectado se adapte a cada proveedor para garantizar su compatibilidad con los requisitos y especificaciones correspondientes. No obstante, el Open Drone ID es una implementación de código abierto del sistema de identificación remota de drones, basada en los anteriores estándares, que promueve la interoperabilidad y la transparencia, y podría ser la solución.

6.2.1. Servicios de vigilancia en U-Space

En el ámbito europeo, para los espacios aéreos U-Space, los servicios de vigilancia forman parte del **servicio de identificación de red** y del **servicio de información sobre el tráfico**, definidos en el Reglamento (UE) 2021/664. El proveedor de servicios U-Space (USSP) es informado de la posición real y del movimiento de la aeronave (vigilancia) principalmente por el propio UAS, el cual proporciona los datos a través del servicio de identificación de red, y, a su vez, lo retransmite al resto de usuarios a través del servicio de información sobre el tráfico.

De esta forma, estos dos servicios ayudan a identificar y controlar los vuelos de los UAS y a distinguir entre drones autorizados y no autorizados:

- El **Servicio de identificación de red**: de acuerdo con el **ConOps** de CORUS (Edición 4) se complementa con el requisito de visibilidad electrónica (iConspicuity) del Reglamento (UE) 2021/666. Estas dos disposiciones exigen que todas las aeronaves que vuelen en el espacio aéreo U-Space comuniquen

periódicamente su posición actual. Esta funcionalidad se puede conseguir de tres maneras:

- Los UAS se comunican con su USSP contratado a través del servicio de identificación de red.
 - Los proveedores de servicios de tránsito aéreo proporcionarán la información pertinente sobre el tráfico de las aeronaves tripuladas al U-Space.
 - Las aeronaves tripuladas a bordo que no reciban un servicio ATC deberán hacerse visibles en el U-Space, emulando a las no tripuladas.
- Los datos se obtendrán de múltiples fuentes para alimentar el servicio de información sobre el tráfico. Esto significa que la calidad y la precisión de los datos entrantes son fundamentales. Los proveedores de servicios también deben garantizar que los datos sean completos, lo que pone de relieve la importancia de la visibilidad electrónica tanto para las aeronaves tripuladas como para las no tripuladas, especialmente en el espacio aéreo no controlado o en zonas no designadas como espacio aéreo U-Space (donde se requiere visibilidad). Esto es esencial para crear una imagen completa.
- Además de compartir en tiempo real la información sobre vigilancia, también es importante analizar los datos recogidos —tanto recientes como pasados— para poder evaluar los posibles riesgos en las zonas donde operan los drones dentro del U-Space.

Los retos a los que se enfrenta la vigilancia de drones en U-Space son:

- **Limitaciones de la línea de visión.** Muchos sistemas de vigilancia tradicionales, como los radares, requieren una línea de visión directa para operar con eficacia. En entornos urbanos densamente edificados, los edificios y otras estructuras pueden bloquear esta visibilidad, reduciendo significativamente la capacidad de detección de estos sistemas.
- **Integración de datos de múltiples sensores.** Un mismo dron puede ser detectado por diferentes sensores, lo que puede generar datos duplicados o inconsistentes. Para resolver este desafío, se emplean algoritmos de fusión de datos que combinan la información de forma precisa, minimizando errores. Además, la asincronía en la transmisión de datos entre sensores puede dificultar la actualización en tiempo real de los UAS en una porción de e espacio aéreo.

- **Gestión centralizada vs. descentralizada.** Un modelo centralizado de vigilancia podría facilitar la integración y el procesamiento eficiente de los datos, permitiendo su distribución coordinada entre los distintos actores del U-Space, como los proveedores de servicios de gestión del tráfico de drones (USSP). No obstante, este enfoque también plantea desafíos en términos de escalabilidad, latencia y resiliencia.
- La vigilancia es clave para la seguridad y el control del tráfico de drones, especialmente en vuelos más allá de la línea de visión (BVLOS) o a gran escala. U-Space ofrece información de tráfico para ayudar a los operadores, pero su utilidad va más allá. **Detectar drones no autorizados** es fundamental para la seguridad, y para ello se necesitan datos de alta calidad, precisos y completos.

En Europa se está trabajando conjuntamente con la aviación general en el desarrollo de soluciones de iConspicuity para que las aeronaves que vuelan en entornos U-Space puedan ser identificadas por otras aeronaves, así como por los sistemas ATM/UTM.

Una de estas iniciativas es el desarrollo del sistema **ADS-L (ADS-Light)**, una versión simplificada del conocido sistema ADS-B, que permite compartir la posición y la identificación de una aeronave. ADS-L está pensado para funcionar con **equipos más económicos**, incluso utilizando **redes de telefonía móvil**, lo que lo hace más accesible para drones y aviación ligera.

Este sistema se basa en las especificaciones técnicas publicadas en el documento **SRD-860** [14], y ya se prevén futuras mejoras para adaptarse aún mejor a las necesidades del U-Space.

Asimismo, hay iniciativas privadas para dar cumplimiento a los requisitos de identificación remota, como la adaptación del sistema FLARM, que en 2018 se lanzó su “FLARM UAS Electronic ID”¹¹. Este sistema transmite la identificación electrónica y la posición 3D de un UAS determinado a través de un mensaje digital de radiofrecuencia.

6.3. Detect and Avoid (DAA)

En los UAS, la ausencia de un piloto a bordo representa un reto en materia de seguridad. Sin embargo, este desafío se puede abordar mediante el uso de sistemas avanzados, conocidos como Sistemas DAA (del inglés, *Detect and Avoid*). Estos sistemas DAA incluyen un conjunto de equipos aéreos y terrestres que trabajan de forma coordinada para permitir al piloto remoto detectar y evitar peligros. Para ello incorporan una variedad de sensores y tecnologías, ya mencionados (p. ej. Radar, LiDAR, cámaras...), y unidades de procesamiento e interfaces de control para el piloto remoto, que garantizan la detección precisa y eficiente de otros objetos en su ruta.



Ilustración 21. Ejemplo de estrategia de Sistema DAA en operaciones de UAS. [fuente propia]

Para llevar a cabo operaciones de UAS de forma segura, el piloto remoto debe ser consciente del entorno que rodea al UAS que tiene a su cargo. Los peligros que se pueden encontrar pueden conocerse a priori (terreno, obstáculos fijos, etc.) o aparecer inesperadamente (otros drones, aeronaves tripuladas, aves, etc.). Las capacidades del sistema DAA deberán hacer frente a una gran variedad de situaciones, así como gestionar conflictos simultáneos. De este modo, se prevé que el sistema DAA pueda:

- Detectar los peligros.
- Proporcionar información sobre la situación al piloto remoto.
- Evaluar las situaciones conflictivas.
- Proporcionar alertas y ayudas para la toma de decisiones.
- Ejecutar la maniobra más apropiada (en caso de que hubiera varias) de resolución de conflicto en nombre del piloto remoto cuando sea necesario.

De esta manera, los sistemas DAA buscan reemplazar las capacidades de un piloto a bordo para detectar (“ver” como lo haría un piloto) y evitar los conflictos, permitiendo que los UAS operen de manera segura y eficiente.

Los sistemas DAA están compuestos por elementos instalados tanto a bordo de la aeronave, como en las estaciones en tierra. En ciertas arquitecturas como la mostrada en la siguiente ilustración, se integran sensores cooperativos y no cooperativos, incluyendo sensores de visión frontal, ADS-B y transpondedores modo S.

En la tabla de la ilustración 22 se resumen algunas de las tecnologías utilizadas o planteadas para ser integradas en sistemas DAA, indicando los peligros que son capaces de detectar.

Sin embargo, no existen actualmente sensores ni tecnologías que proporcionen las capacidades necesarias de detección y evitación para que los UAS de pequeño y mediano tamaño operen en condiciones BVLOS en el espacio aéreo civil. Los estándares publicados están orientados, más bien, a los UAS de gran tamaño que comparten el espacio aéreo con la aviación tripulada.

La RTCA publicó en 2021 la DO-365B “Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Detect and Avoid (DAA) Systems, Minimum Performance Standards for Unmanned Aircraft System”. No se aplica a los UAS pequeños (menos de 25 kg) que operan en entornos de bajo nivel (por debajo de 400 ft) u otras áreas segmentadas.

Asimismo, en noviembre de 2024, EUROCAE publicó el estándar ED-271A “Minimum Aviation System Performance Standards (MASPS) for Detect and Avoid Traffic for Remotely Piloted Aircraft Systems in Airspace Classes A-G under IFR”. Es un estándar pensado para drones de gran envergadura o complejidad, que vuelan en el mismo espacio aéreo que las aeronaves tripuladas convencionales, y no simplemente a baja altura o en zonas restringidas para los drones.

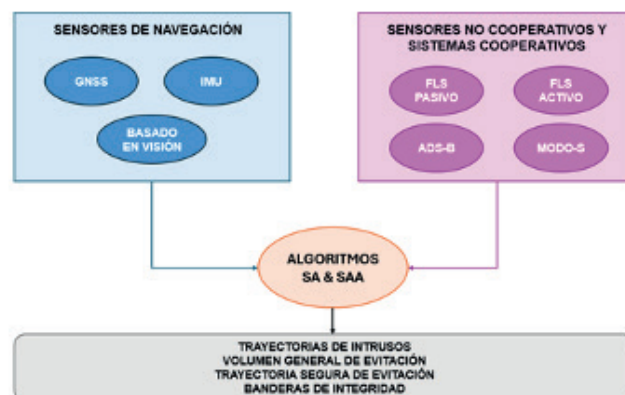


Ilustración 23. Arquitectura del DAA¹²

11. <https://www.flarm.com/en/drones/remote-id-for-uav/>

12. FLS: forward-looking sensors / Sensores prospectivos..

SA: separation assurance SAA: sense and avoid

Tecnología	Descripción	Peligros que pueden detectar			
		Tráfico	Terreno	Obstáculos	Personas/ fauna
Sensores electroópticos e infrarrojos (EO/IR)	Capturan imágenes visuales y térmicas del entorno para detectar objetos y variaciones de temperatura.	✓	✓	✓	✓
Sensores acústicos	Utilizan mediciones de variaciones de presión en el aire o en la velocidad de las partículas generadas por la fuente de un sonido.	✓			
LIDARs	Calculan la distancia al objeto mediante la medición del tiempo de ida y vuelta de diferentes pulsos láser.	✓	✓	✓	
Cámaras	Cámaras de visión monocular (una cámara para detectar obstáculos) o de visión estéreo (dos cámaras, lo que permite el cálculo de la profundidad).	✓	✓	✓	✓
Transpondedores modo C/S	Proporcionan la identificación y la posición de una aeronave a través de señales transmitidas y recibidas por otros equipos equipados con el mismo sistema.				
ACAS II	Sistemas de alerta y prevención de colisiones aéreas que proporcionan advertencias y/o resolución de una posible colisión con otra aeronave equipada con transpondedor.				
ADS-B	Los sistemas ADS-B out difunden periódicamente información acerca de cada aeronave (posición, altitud, velocidad, etc.), mientras que los de recepción (ADS-B in), reciben esta información.	✓		Solo ADS-B out	
Radar	Tecnología que se basa en la emisión de una señal de radio con una frecuencia definida. Cuando la señal se encuentra con un objeto, se refleja (rebota) y vuelve a la antena emisora. Midiendo el tiempo de ida y vuelta de la señal se obtiene la posición del objeto.	✓	✓	✓	✓

Ilustración 22. Tecnologías y sus respectivas capacidades de detección

La selección de sensores de vigilancia dependerá del tipo de UAS, del espacio aéreo en el que opere y de los requisitos de certificación. Toda la información recopilada por los sensores se procesa mediante un algoritmo en el procesador a bordo del UAS, lo que permite generar volúmenes de protección.

En la búsqueda de soluciones viables y eficaces para cumplir con las demandas del DAA, diversas empresas y organizaciones están llevando a cabo investigaciones intensivas. Estos esfuerzos abarcan el desarrollo de tecnologías innovadoras y la exploración de nuevas formas de integrar múltiples sensores para lograr una vigilancia más precisa y fiable. Estos avances no sólo prometen mejorar la seguridad operacional de los UAS en entornos desafiantes, sino también allanar el camino hacia una integración más fluida y segura de estas aeronaves en el espacio aéreo compartido con las aeronaves tripuladas.

7. CARGA DE PAGO

7.1. Definición de carga de pago

Los UAS han evolucionado desde su aplicación inicial concebida para facilitar operaciones militares hasta convertirse en herramientas esenciales para su uso en diversas industrias y servicios en el ámbito civil. Un elemento necesario de los UAS es la carga de pago, o PL (del inglés, Payload), que comprende todo aquello que pueden transportar, sin incluir los componentes esenciales para el vuelo.

La normativa europea relativa a la operación de aeronaves no tripuladas define, en el Reglamento 2019/947, el concepto “carga de pago” o “carga útil” como todo “instrumento, mecanismo, equipo, componente, aparato,

añadido o accesorio, incluido el equipo de comunicación, que esté instalado o fijado en la aeronave y no se utilice ni esté destinado a utilizarse para el manejo o el control de la aeronave en vuelo ni forme parte del fuselaje, el motor o la hélice”.

A continuación, se desarrolla la influencia que la carga de pago tiene en la autonomía y las prestaciones de la aeronave y se analizan los diversos tipos de carga de pago con los que se pueden equipar los UAS, y cómo cada uno de estos tipos amplía sus capacidades para llevar a cabo una amplia gama de tareas o misiones, como se explicará en capítulos posteriores.

7.2. Influencia de la carga de pago

El objetivo de la **misión** del dron determina tanto el tipo de vehículo a elegir (tamaño, configuración, prestaciones) como la carga útil que permitirá cumplir con los requisitos.

No persiguen los mismos objetivos ni tienen los mismos requisitos de operación, una misión de búsqueda y salvamento, una inspección de infraestructura o una fumigación con pesticidas en un campo de cultivo, por nombrar algunos ejemplos.

Si la finalidad es distribuir suministros médicos, la carga de pago podría consistir en vacunas esenciales, medicinas o kits de primeros auxilios.

Si el objetivo es realizar labores de vigilancia en unas instalaciones, la carga de pago podría consistir en: cámaras ópticas, electroópticas o térmicas que permitan detectar amenazas (día y noche).

Además de a la propia misión, la carga de pago afecta significativamente a la **autonomía** del dron, ya que, si se incrementa el peso total de la aeronave debido a una mayor carga útil, ésta necesitará generar una sustentación adicional para mantenerse en el aire y poder realizar la función asignada. El aumento de la sustentación requerida se consigue incrementando la velocidad de rotación de las hélices, que a su vez se obtiene con un consumo de energía eléctrica (o de combustible, en su caso) superior, reduciendo, de esta manera, la autonomía y alcance del dron.

A título ilustrativo, la siguiente gráfica muestra el impacto que el incremento del peso de la carga de pago supone en la autonomía o tiempo de vuelo. Está calculada para un dron cuyo peso, sin carga de pago, es de 1,6 kg (incluyendo las baterías), y un motor T-Motor MN4014 y un rotor APC 12x6e.

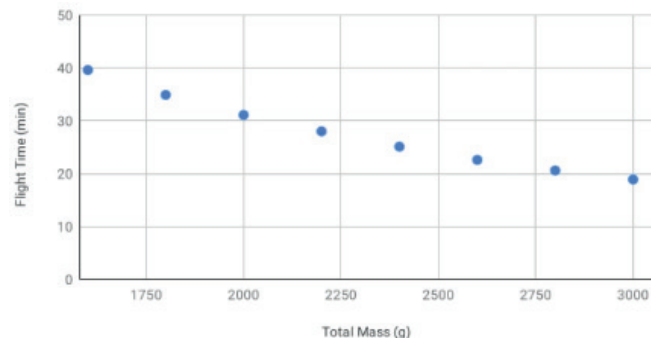


Ilustración 24. Autonomía vs Tiempo de Vuelo [15]

Por ello, es muy importante la elección de la carga de pago necesaria para la misión, y el cálculo del tiempo para realizarla, con objeto de asegurar que la autonomía disponible es suficiente.

Finalmente, cabe destacar que no sólo es importante el peso de la carga de pago, sino también su colocación, puesto que ésta influye en la **distribución de los pesos y en la posición del centro de gravedad** de la aeronave. Esto tiene su importancia porque un cambio en el centro de gravedad puede cambiar el comportamiento en vuelo del dron y su respuesta a las órdenes de mando, influyendo así en su maniobrabilidad e incrementando, con ello, el riesgo de la operación.

7.3. Tipos de Carga de Pago

A continuación, se describen algunos de los tipos de sensores [16] [17] que se embarcan en los drones como carga de pago:

- **Cámaras electroópticas (EO):** Estas cámaras combinan elementos ópticos y electrónicos para capturar, dentro del espectro visible, información visual detallada y precisa, como son imágenes fijas (fotográficas) y en movimiento (vídeo) de alta calidad, o incluso una mezcla de ambas. Debido a sus características, son de mayor utilidad durante el día, que es cuando permiten obtener una calidad de imagen óptima, resintiéndose en condiciones de baja luminosidad. En cuanto a funcionalidades, tienen la capacidad de pivotar, realizar zoom y enfocar, por lo que, junto con la calidad de imagen que ofrecen, son utilizadas para una gran variedad de aplicaciones.
- **Cámaras térmicas de infrarrojo (IR):** Dispositivos que trabajan en el rango del infrarrojo del espectro electromagnético, y detectan la energía térmica,

mediando la radiación infrarroja emitida por los objetos, obteniendo una representación visual de su temperatura. Sus aplicaciones son realmente variadas, dado que se pueden detectar irregularidades de todo tipo y en contextos muy distintos; desde la detección de personas en lugares de difícil acceso, hasta la identificación de puntos calientes en líneas eléctricas u otras estructuras. Asimismo, pueden ser refrigeradas, en cuyo caso, al absorber el calor, se obtiene una mejor discriminación de imagen; o no refrigeradas, y, en su lugar, ser más ligeras.

- **LiDAR (Light Detection and Ranging):** Tecnología de detección remota que emite pulsos de luz láser (rango del infrarrojo del espectro electromagnético) y registra los retornos contra la superficie, obteniendo una nube de puntos del terreno de forma remota. Esto permite medir distancias y crear mapas topográficos detallados y modelos tridimensionales del terreno de alta precisión de los objetos reflejados, dado que combina movimientos longitudinales (conforme a la trayectoria del propio UAS) y transversales para escanear el terreno. El LiDAR es una tecnología popular y accesible en términos de sensores transportados a bordo, ya que puede ser relativamente pequeña, ligera y consume poca energía, lo que la hace idónea especialmente para UAS pequeños, que no poseen la capacidad de carga y la potencia necesaria para embarcar sistemas radar de mayor tamaño.
- **RADAR (Radio Detection and Ranging):** Sistema basado en las ondas electromagnéticas que, mediante la emisión de pulsos de radio y la detección de la onda reflejada, permite medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos, y crear una imagen bidimensional. Un tipo de radar más avanzado es el radar de apertura sintética (SAR), que mediante técnicas de procesamiento de señal permite simular una antena mucho más grande en comparación con sus dimensiones físicas reales, pudiendo así proporcionar una mayor resolución espacial. Como ventaja adicional respecto a una cámara convencional, la existencia de nubes no supone un obstáculo para la generación de imágenes. Como desventaja, las imágenes del SAR presentan menor resolución.
- **Cámaras de visión estéreo:** Disponen de dos o más lentes, cada una de ellas con un sensor propio, para captar imágenes desde diferentes ángulos, emulando la visión humana a través de lentes binoculares, y permitiendo aplicar la fotografía estereoscópica para obtener imágenes 3D. Esta capacidad las hace

útiles para muy diversas aplicaciones, como pueden ser la navegación autónoma del propio dron, ya que permiten que éste pueda percibir la profundidad y la distancia a los objetos circundantes.

- **Cámaras multispectrales:** Permiten capturar distintos espectros o imágenes más allá del rango visible para el ojo humano. Mediante el uso de sensores especializados pueden detectar la radiación en diferentes longitudes de onda o bandas del espectro electromagnético no contiguas (con una resolución baja), como el infrarrojo cercano (NIR), el infrarrojo medio (MIR) o el infrarrojo térmico (TIR). Esta característica las hace muy versátiles, por lo que pueden utilizarse en gran variedad de aplicaciones, principalmente en tareas de monitorización, desde la agricultura de precisión hasta la detección de incendios.
- **Cámaras hiperespectrales:** Permiten captar información más allá del espectro visible, pudiendo recoger cientos de bandas espectrales muy estrechas y contiguas con alta resolución, lo que les permite una identificación más fina de los materiales, y detectar y analizar con gran precisión sus propiedades y, por ello, de igual manera son de utilidad en una gran variedad de aplicaciones.
- **Carga de pago “pasiva”:** Carga de pago destinada únicamente a ser transportada, no contribuyendo a la realización de toma de imágenes, datos o medidas. La misión del dron consiste en este caso, en trasladar la carga de pago de un lugar a otro y entregarla. Constituye el caso típico de las operaciones de logística, paquetería, etc. La carga de pago en sí podría ser cualquier objeto: paquetes, mercancías, alimentos y bebidas, equipos médicos (o incluso órganos para trasplantes), materiales de construcción, entre otros.
- **Medidores ultrasónicos de espesor:** Dispositivos que utilizan ondas de sonido de alta frecuencia para medir el grosor de diversos materiales de manera precisa y no destructiva. Un dron así equipado puede ser de aplicación en campos como la inspección de infraestructuras, facilitando la detección de problemas tales como la corrosión o el desgaste en tuberías, tanques y puentes, sin necesidad de acceder físicamente a la superficie.
- **Escáner de códigos:** Dispositivos que permiten leer e interpretar la información codificada en etiquetas y códigos impresos, como los códigos de barras y los códigos QR. Su instalación en un dron hace

que éste sea útil principalmente para la logística e inventariado, por su rapidez y eficiencia para la lectura de etiquetas de productos, pallets o contenedores en almacenes, centros de distribución y otros entornos logísticos.

- **Detectores de gas:** Sensores que permiten identificar y medir la presencia de diferentes tipos de gases en el aire, y, que, una vez instalados en un dron, se pueden utilizar en distintos ámbitos.
- **Sistema de relé de radio:** Sistema formado por un receptor de radio, un amplificador y un transmisor que permite utilizar el dron como un relé de comunicaciones con el objetivo de mejorar la cobertura o la calidad de las comunicaciones en una zona determinada.
- **Sistemas de pulverización o de riego:** Sistemas dotados de un depósito contenedor de líquidos y un sistema de pulverización para realizar tareas de fumigación de campos de cultivo con pesticidas, aplicación de fertilizantes, o vertido de agua de riego.
- **SONAR (Sound Navigation and Ranging):** Tecnología que utiliza ondas de sonido para detectar, localizar y medir la distancia a objetos sumergidos en el agua y que podría utilizarse, entre otras, en operaciones submarinas.
- **Magnetómetros:** Permiten recopilar datos magnéticos en vuelo, y en base a ellos, crear mapas magnéticos de la superficie terrestre. Pueden utilizarse para identificar estructuras subterráneas, como minerales, tuberías, cables y otros objetos metálicos (como pueden ser incluso artefactos explosivos sin detonar), y para la prospección geológica, resultando así, de gran aplicación en diversos campos científicos y prácticos, como la geología, la arqueología y la minería.
- **Sensores de gas CO2:** Dispositivos diseñados para detectar y medir la concentración de dióxido de carbono (CO2) en el ambiente. Los UAS pueden utilizarlos para la monitorización ambiental: medir la calidad del aire en áreas urbanas e industriales, vigilar la absorción de CO2 en un ecosistema natural o medir la concentración de CO2 en glaciares y polos; para el control de las emisiones industriales; o, en agricultura, para medir las concentraciones de CO2 en invernaderos o campos de cultivo y así optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas.

8. SITUACIÓN DE LOS UAS EN ESPAÑA¹³

El sector de las aeronaves no tripuladas en España ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, consolidándose como una de las industrias aeronáuticas con mayor potencial de desarrollo. De acuerdo con los datos de la **Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA)**, España cuenta con 123.609 operadores registrados y 119.609 pilotos remotos certificados, lo que supone un incremento del 27% con respecto al año anterior, reflejando un ecosistema en expansión con aplicaciones en sectores estratégicos como la seguridad, la agricultura, la logística y la inspección de infraestructuras.

En términos de equipamiento, se ha alcanzado la cifra de 13.274 unidades registradas bajo la categoría específica, entre las cuales destacan cinco modelos de eVTOL, tecnología emergente con aplicaciones en movilidad aérea urbana. Asimismo, se han identificado 462 modelos distintos de UAS operando en el territorio español, lo que evidencia una diversificación en el tipo de aeronaves utilizadas, desde UAS de pequeño tamaño, empleados en fotografía y cartografía, hasta aeronaves más avanzadas destinadas a operaciones industriales y de vigilancia.

De acuerdo con [5] (marzo, 2024), España ocupa el 4º puesto a nivel mundial (por detrás de EEUU, China e Israel) en tipos diferentes de UAS registrados con MTOW inferior a 500 lb.

La evolución del sector ha estado intrínsecamente ligada a los avances normativos que han permitido su integración segura en el espacio aéreo nacional. España ha sido pionera en la regulación de los UAS, estableciendo un marco normativo propio con la promulgación de la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, que sentó las bases para la regulación de estas aeronaves. Esta normativa inicial permitió estructurar un sector emergente que, en pocos años, experimentó un desarrollo sin precedentes. Posteriormente, con la armonización de la normativa a nivel europeo, se implementaron los **Reglamentos Delegado (UE) 2019/945** y de **Ejecución (UE) 2019/947**, que establecieron directrices comunes para la fabricación y operación de UAS en todos los Estados miembros, fortaleciendo la seguridad y la eficiencia operativa.

Operadores UAS registrados en AESA

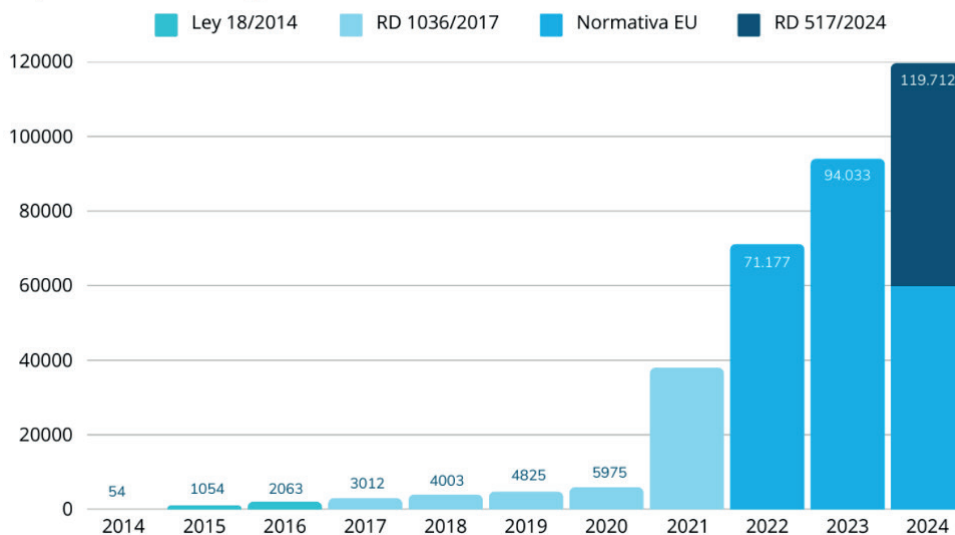


Ilustración 25. Evolución de los operadores UAS registrados en AESA. [Fuente: Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA)].

Asimismo, el crecimiento ha venido acompañado de un desarrollo significativo en la formación y certificación de operadores. Actualmente, España cuenta con 579 organizaciones de formación reconocidas para la capacitación en escenarios estándar y 16 organizaciones de formación designadas, lo que ha permitido la emisión de 224.033 certificados hasta 2025. Además, el número de instructores especializados en la certificación de categoría específica asciende a 121, contribuyendo a la profesionalización de la industria.

En cuanto a la operativa de los UAS, 6.522 operadores han sido habilitados para volar en escenarios estándar (STS), mientras que 141 cuentan con autorizaciones operacionales específicas vigentes, incluyendo una autorización LUC, que permite operar con mayor flexibilidad dentro del marco comunitario. Este avance ha permitido que los UAS sean empleados en un espectro cada vez más amplio de misiones, desde inspecciones técnicas en entornos de difícil acceso hasta operaciones de investigación I+D. AESA ha tenido un papel protagonista en la supervisión de estas operaciones, asegurando que la integración de estas aeronaves en el espacio aéreo se realice de manera segura y eficiente.

La publicación del Real Decreto 517/2024 ha marcado un nuevo hito en la regulación del sector, consolidando la integración de los reglamentos europeos y estableciendo especificaciones nacionales que refuerzan la seguridad y potencian el desarrollo de la industria. Dicho decreto no sólo garantiza la operatividad segura de los UAS en el

espacio aéreo español, sino que también promueve la implementación del espacio U-Space y la gestión avanzada del tráfico de UAS, facilitando la coexistencia con la aviación tradicional y potenciando el crecimiento del sector.

AESA, como autoridad, ha impulsado el uso de plataformas electrónicas como la Sede Electrónica, que centraliza el registro de operadores, la presentación de declaraciones y la tramitación de autorizaciones de los UAS. Además, colabora con otras entidades como ENAIRE en herramientas como ENAIRE DRONES, que facilita la consulta de espacios aéreos, y que permite planificar operaciones UAS y coordinar el uso del espacio aéreo. También destaca el SNS (Sistema de Notificación de Sucesos), una plataforma de AESA destinada a la notificación obligatoria de incidentes y sucesos relacionados con la seguridad operacional, incluyendo aquellos vinculados a UAS.

España sigue consolidándose como un actor relevante en el ámbito de los UAS, impulsando la innovación y la integración de estas aeronaves en el espacio aéreo nacional. La creciente adopción de tecnologías avanzadas, junto con la expansión y el incremento de pilotos, posiciona al país como uno de los referentes en la industria de los UAS en Europa.

Con una infraestructura formativa en constante crecimiento y un ecosistema normativo que favorece la seguridad y el desarrollo tecnológico, España se proyecta como un entorno favorable para la evolución de las aeronaves no tripuladas en los próximos años.

CONCLUSIONES

Frente a la aviación tradicional, los UAS de pequeño y mediano tamaño presentan una diversidad de configuraciones (ala fija, ala rotatoria e híbridos) que permiten adaptarse a diferentes misiones y entornos operativos, y alcanzar un equilibrio entre capacidad de carga y autonomía.

Ante la gran variedad de alternativas en el mercado, es fundamental seleccionar adecuadamente el tipo de dron, para aprovechar al máximo sus capacidades. Por ello, es preciso analizar con detalle la naturaleza de la misión, que determinará el tipo de carga de pago (cámaras, detectores y sensores, sistemas de pulverización de sustancias, paquetería, etc.), el entorno en el que se llevará a cabo y las exigencias técnicas necesarias para ejecutarla con eficiencia y un nivel de seguridad aceptable.

Uno de los aspectos fundamentales para la seguridad de las operaciones es el desarrollo de soluciones innovadoras para detectar y evitar obstáculos y otras aeronaves, concepto conocido como DAA, que permitirá a los UAS detectar su entorno, anticiparse a riesgos y actuar de forma autónoma.

Especialmente en entornos urbanos, los UAS se enfrentan a desafíos por las limitaciones de alcance, interferencias y fiabilidad de los enlaces de comunicaciones. Aunque tecnologías emergentes, como las redes 5G y el SLAM, prometen mejorar la conectividad y la navegación en tiempo real, su integración plena aún se enfrenta a barreras técnicas y regulatorias.

España se ha posicionado como uno de los referentes europeos en este sector, con un ecosistema en crecimiento que incluye miles de operadores, pilotos formados, nuevos modelos registrados y una normativa que acompaña este desarrollo con visión y rigor.

Piloto grabando imagen con un dron durante un rally [Cortesia DESALT International Drones].



REFERENCIAS

1. Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021 Ministerio de Fomento https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/plan_estrategico_drones_2018-2021_0.pdf
2. Ftal. Fabián Reuter / Ing. Ftal. Amilcar Pedenovi. Serie Didáctica N° 40 Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería Ing.– Facultad de Ciencias Forestales – UNSE https://fcf.unse.edu.ar/wp-content/uploads/2014/07/SD-43-Drones-y-su-aplicacion-a-la-ingenieria-REUTER_r.pdf
3. Drones & eVTOL Designs <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/drones-evtol-designs>
4. Regulating Autonomy in Civilian Drones: Towards a Spectral Approach Samar Abbas Nawaz. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-024-02056-9>
5. Comparison of Size and Performance of Small Vertical and Short Takeoff and Landing UAS by Nicholas Kakavitsas, Andrew Willis, James M Conrad and Artur Wolek <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10521006> , https://github.com/roboticsuncc/VSTOL_UAS_Database
6. Comunicaciones en sistemas aéreos no tripulados (UAS) [Review of Comunicaciones en sistemas aéreos no tripulados (UAS)]. BIT, 227, 48–51. Calvente, J. J., & E. Márquez, R. (2023, March 26). <https://bit.coit.es/comunicaciones-en-sistemas-aereos-no-tripulados-uas/>
7. ICAO Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) Concept Of Operations For International IFR Operations. March 2017. <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/ICAO%20RPAS%20Concept%20of%20Operations.pdf>
8. Means of Compliance with Light-UAS.2511 Containment <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/134296/en>
9. Handbook of unmanned aerial vehicles. Springer Reference. K Valavanis, & Vachtsevanos, G. J. (2015). https://www.researchgate.net/publication/278680332_Handbook_of_Unmanned_Aerial_Vehicles
10. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Norwood, Massachusetts, United States of America: Artech House, 2008. P. D. Groves, https://www.researchgate.net/publication/224969497_Principles_of_GNSS_Inertial_and_Multisensor_Integrated_Navigation_Systems_Second_Edition
11. CONOPS 4 de Corus Apartado 3.7.4 “U-Space Surveillance means. <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20CONOPS%204th%20edition.pdf>
12. Modelling and Simulation of Collaborative Surveillance for Unmanned Traffic Management Juan A. Besada *, David Carramiñana, Luca Bergesio, Ivan Campaña and Ana M. Bernardos 2022. <https://www.researchgate.net/>

- publication/358683481_Modelling_and_Simulation_of_Collaborative_Surveillance_for_Unmanned_Traffic_Management
13. Remote Identification of Unmanned Aircraft 2021 Federal Register: Remote Identification of Unmanned Aircraft
 14. EASA. Technical Specification for ADS-L transmissions using SRD-860 frequency band (ADS-L 4 SRD-860) https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/ads-l_4_srd860_issue_1.pdf
 15. Tyto Robotics How Does Drone Payload Affect Flight Time (October 20, 2023, Lauren Nagel, <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-does-drone-payload-affect-flight-time>)
 16. A comprehensive review on payloads of unmanned aerial vehicle Siva Sivamani Ganesh Kumar Abhishek Gudipalli <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982324000607#b0150>
 17. Unmanned aerial vehicles: A review Asif Ali Laghari a.*, Awais Khan Jumani , Rashid Ali Laghari , Haque Nawaz <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667241322000258?via%3Dihub>
 18. Hashim, H. A. (2024). Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024020292>
 19. Hydrogen fuel cell-powered drone ambulance for the emergency medical services, *Future Energy* 1 (1) (2022) 6–11. E. Taylor, J. Rivera, https://www.researchgate.net/publication/359504680_Hydrogen_Fuel_Cell-Powered_Drone_Ambulance_for_the_Emergency_Medical_Services
 20. Critical review on development of magnesium alloy as anode in mg-air fuel cell and additives in electrolyte, *Int. J. Energy Res.* 45 (11) (2021) 15739–15759. N.S. Hazri, S. Basri, S. Kamarudin, A.M. Zainoodin, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.6881>
 21. Energetic, exergetic, economic, and exergoeconomic analysis of a phosphoric acid fuel cell-organic Rankine cycle hybrid system, *Energy Convers. Manag.* 284 (2023) 116993. S. Oh, T. Kim, S. Kim, S. Kang, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890423003394>
 22. Recent development in design a state-of-art proton exchange membrane fuel cell from stack to system: theory, integration and prospective, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (21) (2023) 7828–7865. L. Fan, Z. Tu, S.H. Chan. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922055306>
 23. Reconfigurable battery techniques and systems: a survey, *IEEE Access* 4 (2016) 1175–1189. S. Ci, N. Lin, D. Wu, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7442763>
 24. A review on thermal management of lithiumion batteries for electric vehicles, *Energy* 238 (2022) 121652. X. Zhang, Z. Li, L. Luo, Y. Fan, Z. Du, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221019009>
 25. xEV Li-Ion battery low temperature effects, *IEEE Trans. Veh. Technol.* 68 (5) (2019) 4560–4572. C. Vidal, O. Gross, R. Gu, P. Kollmeyer, A. Emadi, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8671735>
 26. Power electronics-enabled self-x multicell batteries: a design toward smart batteries, *IEEE Trans. Power Electron.* 27 (11) (2012) 4723–4733. T. Kim, W. Qiao, L. Qu, <https://ieeexplore.ieee.org/document/61260561>
 27. A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements, *Heliyon* 6 (11) (2020). A. Townsend, I.N. Jiya, C. Martinson, D. Bessarabov, R. Gouws, [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(20\)32128-9](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(20)32128-9)
 28. Enhanced hybrid energy storage system combining battery and supercapacitor to extend nanosatellite lifespan, *Results Eng.* 23 (2024) 102634. A. Daghour, S. El Hani, Y. El Hachimi, H. Mediouni, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024008892>
 29. G. Zhou, H. Chen, Y. Cui, Formulating energy density for designing practical lithium–sulfur batteries, *Nat. Energy* 7 (4) (2022) 312–319. [http://refhub.elsevier.com/S2590-1230\(24\)02029-2/bibFB91B78B52E742B19FF682954FD387CEs1](http://refhub.elsevier.com/S2590-1230(24)02029-2/bibFB91B78B52E742B19FF682954FD387CEs1)
 30. Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. Boewn Zhang, et al. January 2022. *Energies* 2022, 15, 455. <https://doi.org/10.3390/en15020455>



Dron DJI Agras T50 fumigando un campo [Fuente: <https://www.scorpiondrones.com>].

Aplicaciones de los UAS civiles

Fco. Germán González Antequera
Pedro J. García Moreno
Laura Parga Gata
María Saíz Coronado

Los UAS han transformado radicalmente el modo de realizar y prestar un gran número de tareas y servicios, facilitando su ejecución de forma más rápida, segura, eficiente o económica, según el caso, con relación a los métodos tradicionales anteriores.

Desde la irrupción en el mercado de las primeras soluciones para el uso de UAS, su empleo ha experimentado un crecimiento exponencial en áreas muy diversas de la actividad humana. En este capítulo se exploran los principales usos actuales de los UAS (al margen de la Movilidad Aérea Urbana y las Operaciones en el Espacio Aéreo Superior que serán descritas en los capítulos 5 y 6, respectivamente). Aunque, al tratarse de una tecnología en pleno desarrollo y en continua expansión, las aplicaciones que se desarrollan en torno a ella son cada día más numerosas.



1. VENTAJAS DEL USO DE UAS

En general, independientemente de la aplicación a la que se destine, la utilización de UAS proporciona ciertas ventajas frente a otros métodos tradicionales:

- Reducción de los costes de operación.
- Facilitan la operación en áreas peligrosas o de difícil acceso.
- Mejoran la seguridad del personal involucrado en la operación.
- Mejoran la calidad del trabajo realizado, dado que pueden tomar una mayor cantidad de datos, con la misma o mayor precisión.
- Pueden realizar la operación en menos tiempo, mejorando la eficiencia.
- Permiten una mayor rapidez en el despliegue (frente a otras plataformas como aviones, helicópteros o vehículos terrestres).
- Ofrecen una mayor sostenibilidad medioambiental.
- Se reduce la infraestructura necesaria para la operación.
- Posibilidad de reutilizar el UAS para diferentes tipos de misión modificando su carga de pago.
- Capacidad de repetir rutas programadas, para la realización de misiones repetitivas, sin necesidad de realizar otra vez la planificación del vuelo.
- Facilitan el incremento en la frecuencia de realización de las misiones.

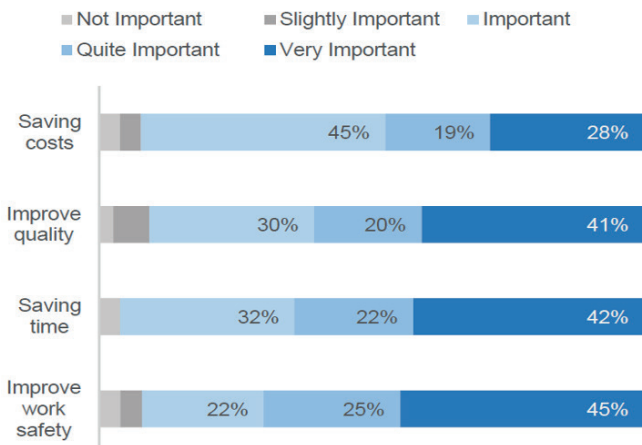


Ilustración 1. Encuesta realizada a nivel mundial a empresas que usan UAS acerca de los motivos para utilizarlos [Fuente: "The Global Drone Industry Barometer 2023 Drone Industry Insights | Whitepaper | August 2023"].

2. RETOS PARA EL USO DE UAS

El empleo de UAS para la realización de operaciones en el entorno civil presenta también una serie de desafíos o puntos de mejora, que son comunes a todas ellas:

- El uso comercial de UAS está sujeto a regulaciones estrictas en muchos países, que incluyen la obtención de permisos específicos y el cumplimiento de normativas, como por ejemplo en materia de seguridad o privacidad.
- Existen ciertas limitaciones técnicas que pueden condicionar la operativa, como por ejemplo la duración de la batería (con el consiguiente impacto en la autonomía de vuelo) y la capacidad para llevar cargas de pago pesadas.
- La operación bajo condiciones meteorológicas adversas (principalmente en el caso de UAS de tamaño reducido).
- La capacidad para operar en espacios interiores por la pérdida de cobertura de la señal GPS.
- La capacidad de procesamiento de cantidades masivas de datos, mejorable con el apoyo de tecnologías de Inteligencia Artificial y el Machine Learning.
- La operación multi-UAS, para que varios UAS puedan trabajar de forma cooperativa.
- La integración con los sistemas existentes puede plantear desafíos técnicos y de compatibilidad.

3. PRINCIPALES APLICACIONES

En este apartado se describen las aplicaciones con un mayor nivel de implantación en el mercado, o un uso más extendido en el entorno civil de operación.

3.1. Teledetección (Remote Sensing)

La teledetección es una técnica para la adquisición de datos de la superficie terrestre a través de diferentes tipos de sensores, resultando de aplicación en un gran número de sectores. Algunos de ellos, por su especial implantación, se desarrollan de manera más específica a lo largo de este capítulo, como por ejemplo, la agricultura de precisión o la topografía; en este apartado se aborda un tratamiento más general de la teledetección.

Anteriormente, la teledetección se realizaba mediante el uso

de satélites, equipados con la carga de pago necesaria para el tipo de datos que se pretendía obtener: cámaras RGB¹, LIDAR², cámaras multispectrales o hiperespectrales o RADAR³, por ejemplo.

El uso reciente de UAS para las aplicaciones de teledetección presenta las siguientes ventajas frente al empleo de satélites:

- La plataforma está mucho más cerca del terreno, por lo que la resolución en las medidas tomadas aumenta considerablemente, pudiendo ser hasta de unas 100 veces mayor⁴.
- Se puede utilizar un único vehículo para diferentes aplicaciones o tomas de datos. Esto permite su reutilización para diferentes usos o la utilización de

diferentes sensores, mientras que el satélite tiene una carga de pago fija y está limitado durante toda su vida útil a una misma misión.

- Los satélites orbitan continuamente alrededor de la Tierra, aunque su función esté limitada a una porción de la superficie terrestre, mientras que los UAS realizan su vuelo únicamente sobre la superficie objetivo. Por ello la misión con UAS no tiene restricciones de tiempo, al no estar condicionada por los tiempos de paso del satélite por la zona de interés, ni por otros factores como el ángulo de observación.

Además de los usos específicos que se desarrollan en este capítulo, en la siguiente ilustración se muestra una amplia variedad de aplicaciones de las técnicas de teledetección mediante UAS

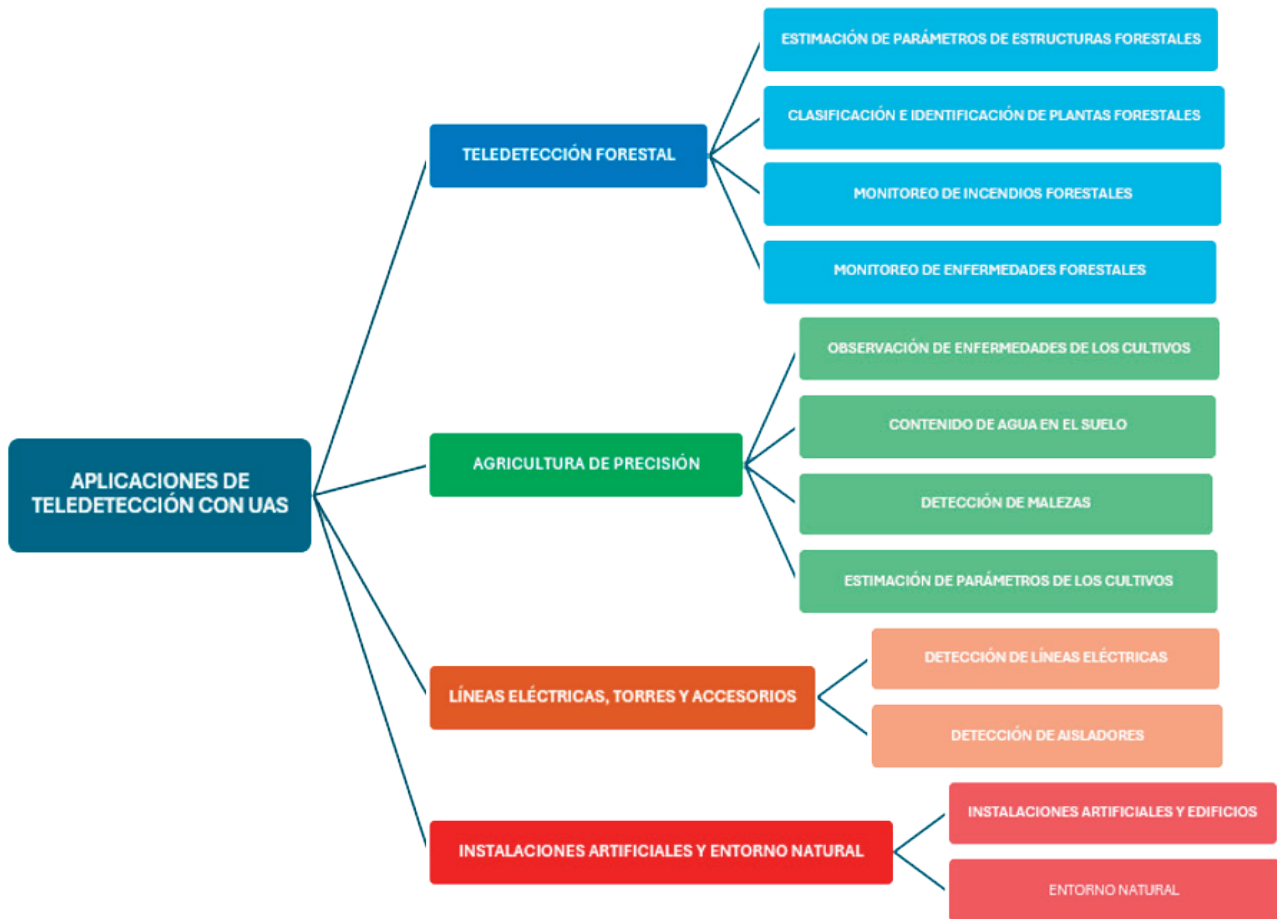


Ilustración 2. Ejemplos de aplicaciones de la teledetección
 [Fuente: "A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications"]

1. RGB: rojo, verde y azul, por sus siglas en inglés; las cámaras de este tipo captan la luz utilizando tres sensores que separan ésta en sus componentes rojo, verde y azul.

2. LIDAR: Light Detection And Ranging. Sistema de teledetección que utiliza pulsos de luz láser para medir distancias.

3. RADAR: Radio Detection And Ranging. Sistema que utiliza radiaciones electromagnéticas reflejadas por un objeto para determinar su localización y/o velocidad.

4. "A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications", by Zhengxin Zhang and Lixue Zhu. <https://www.mdpi.com/2343530>

Para una gama tan amplia de aplicaciones son necesarios distintos tipos de UAS, ya que las características propias de cada misión demandan de la plataforma unas prestaciones específicas. Así, se utilizan tanto UAS multirrotor, como de ala fija, híbridos e incluso helicópteros no tripulados, siendo los más populares los multirrotor, de 4, 6 y hasta 8 rotores.



Ilustración 3. Utilización de UAS para seguimiento de fauna. (Imagen generada con IA).

En España existen diversas empresas que ofrecen servicios con drones usando técnicas de teledetección, en campos como la topografía/fotogrametría/cartografía, proyectos de ingeniería civil, seguimiento de obras, inspecciones técnicas, agricultura de precisión, etc.

3.2. Monitorización y control del tráfico

La monitorización y control del tráfico la realizan las autoridades (en España la Dirección General de Tráfico), a través de centros de gestión cuya misión es:

- La gestión y el control del tráfico.
- El incremento de la seguridad vial.
- La resolución de incidencias.

Estos centros se apoyaban habitualmente en la información suministrada por las infraestructuras fijas desplegadas al efecto, esto es, aforadores⁵, cámaras y radares. Estos dispositivos capturan imágenes en vivo del tráfico y obtienen información sobre la cantidad de vehículos, su velocidad y la densidad del tráfico, que son transmitidos a los centros de

gestión, donde se analizan para detectar incidencias y poder tomar las medidas oportunas en cada caso. De manera puntual, estas actividades de monitorización se han venido complementando mediante el uso de helicópteros tripulados, elevando lógicamente el coste de la operación.



Ilustración 4. Ejemplo UAS de la DGT [Fuente: DGT]

La información de interés para los usuarios se proporcionaba mediante paneles informativos.

Desde hace ya unos años se incorporaron los UAS al sistema, para reforzar la vigilancia, el control y la gestión del tráfico. Los UAS permiten reforzar temporalmente la vigilancia en tramos de la red donde se requiere, sin necesidad del desplegar una infraestructura permanente y costosa, mejorando, entre otras, de forma eficiente y económica, la seguridad vial, la respuesta ante accidentes, la monitorización del estado de las carreteras y el tráfico.

En España, la DGT dispone de un UAS multirrotor equipado con zoom óptico y digital, y capacidad de seguimiento automático de vehículos.

Como evolución del concepto tradicional, ya es una realidad la implantación de los primeros Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativos (C-ITS). Estos sistemas proporcionan servicios innovadores en relación con los diferentes modos de transporte y la gestión del tráfico, y permiten a los distintos usuarios estar mejor informados y hacer un uso más seguro, más coordinado y «más inteligente» de las redes de transporte. Son sistemas cooperativos que tienen la capacidad de integrar y distribuir gran cantidad de información en tiempo real, incluyendo a los usuarios (vehículos) dentro del proceso, a través de un sistema de comunicaciones Vehículo-Infraestructura (V2I) o entre los propios vehículos (V2V).

5. Sistemas para el conteo de vehículos basados en distintas tecnologías, como los tubos neumáticos o los lazos inductivos.

La arquitectura de los sistemas C-ITS se basa en 3 elementos principales:

- Centro de Gestión. Es el nodo de proceso y gestión de la información del sistema.
- RSU (Road Side Unit). Es el elemento a través del cual los usuarios acceden a la infraestructura de la red mediante enlaces V2I. Es un equipamiento instalado físicamente en la red de carreteras.
- OBU (On Board Unit). Es el elemento instalado en el propio vehículo, que transmite información propia (posición, velocidad...) al sistema y recibe información procesada de utilidad para él (estado de las infraestructuras, del tráfico...)

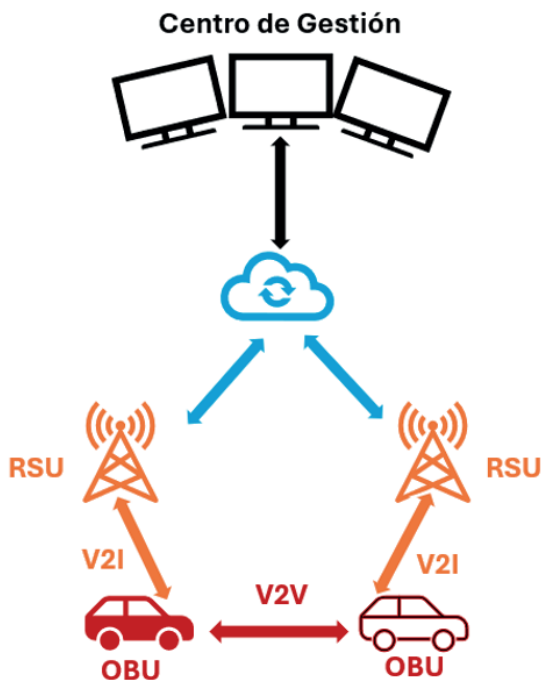


Ilustración 5. Arquitectura del sistema C-ITS

Dentro de este novedoso sistema los UAS tienen un gran papel que desempeñar: pueden utilizarse como una unidad RSU de despliegue rápido en caso de necesidad allí donde no existen unidades fijas desplegadas. Por ejemplo, si hay un accidente en un área sin ninguna RSU instalada, el centro de gestión puede activar un UAS para que vuele hasta la ubicación del accidente y aterrice en un lugar adecuado para transmitir información y advertir a todos los vehículos que se aproximen sobre el incidente específico. En términos simples, se trata de usar UAS para llevar servicios de comunicación y gestión del tráfico a áreas donde no hay infraestructura terrestre disponible.

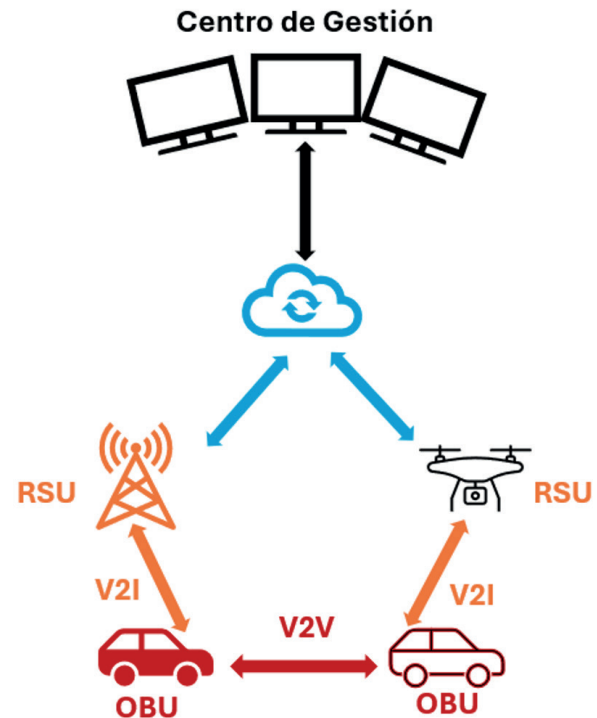


Ilustración 6. Arquitectura del sistema C-ITS con un UAS como RSU

Los principales retos a los que se enfrenta la aplicación de los UAS para la actividad de monitorización y control del tráfico son:

- La preservación de la privacidad de la información sensible, como la ubicación o las imágenes de los usuarios de la red de carreteras, en el caso de su uso como complemento a la función de vigilancia.
- El desarrollo de algoritmos de coordinación precisos para permitir la integración efectiva del UAS en los sistemas de transporte inteligente para complementar la red de RSUs.

3.3. Operaciones SAR

Las operaciones SAR (Search and Rescue) son actividades de búsqueda y salvamento que se llevan a cabo en situaciones de emergencia, como accidentes o desastres naturales.

Tradicionalmente este tipo de operaciones se ha realizado mediante el uso de aeronaves tripuladas (típicamente helicópteros), equipos terrestres y unidades caninas de búsqueda, dependiendo de la operación concreta.

Los UAS están permitiendo complementar, e incluso sustituir en algunos casos, a los medios tradicionales. Las principales ventajas que ofrecen son la velocidad o inmediatez, tanto en la obtención de información como en el propio despliegue de la operación, que en este tipo de operaciones de salvamento es vital. Además, mediante el uso de UAS se facilita el llegar a áreas de acceso difícil o peligroso, que de otro modo podrían resultar casi inaccesibles, evitando así riesgos a los equipos de rescate.

El tipo de funciones que los UAS son capaces de realizar en apoyo a las operaciones SAR es muy variado. A continuación, se incluye una serie de ejemplos de uso, junto con las características típicas de cada uno.

- **Mapeo de zonas en caso de desastre.** Por ejemplo, inundaciones, con la finalidad de evaluar los daños o conocer la situación de la zona. Como carga de pago se equipan una o varias cámaras de alta resolución.
- **Localización de personas en zonas oscuras,** ya sea en situaciones de avalancha o en misiones nocturnas. En este caso la carga de pago son cámaras térmicas.
- **Realización de entregas rápidas de ayuda** (comida, bebida o medicinas) a zonas de difícil acceso, para lo que la única carga de pago imprescindible sería el propio objeto de entrega. Normalmente el UAS utilizado es de tipo multirrotor.



Ilustración 7. Operaciones de asistencia y rescate en alta mar con UAS [Imagen generada con IA].

6. Este término hace referencia a vehículos pesados o maquinaria equipada con un sistema de tracción similar al de un carro de combate, formado por una banda flexible compuesta por una serie de eslabones que permiten un desplazamiento estable incluso en terrenos irregulares.



Ilustración 8. Operaciones de asistencia y rescate en alta montaña [Imagen generada con IA].

En España, diversos organismos públicos hacen uso de los UAS para diferentes tipos de operaciones SAR. Entre ellos, las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, cuerpos autonómicos de Bomberos, la Unidad Militar de Emergencias (UME) o Salvamento Marítimo.

3.4. Inspección de infraestructuras

Para las labores de inspección destinadas a conocer el estado de diversos tipos de infraestructuras, tradicionalmente se ha requerido el uso de ciertos medios, equipamiento o herramientas específicos que convertían la operación en costosa, complicada, lenta, y en general, poco eficiente.

Así, era frecuente el uso de medios como la instalación de andamiajes, o vehículos especializados (helicópteros, orugas⁶ o plataformas elevadoras), así como realizar actividades de cierto riesgo, como la operación en altura por parte de especialistas sujetos con arneses. Y en algunos casos, se utilizaban métodos más rudimentarios, como hacer el recorrido de la inspección a pie, como en el caso de las inspecciones de las vías ferroviarias, por ejemplo.

En cuanto a la toma de datos, ésta estaba bastante limitada a la observación visual de las instalaciones, recopilación de medidas y evaluación de niveles de corrosión en los materiales, o lo que los recursos disponibles permitieran. Con el uso de UAS se abre la posibilidad de obtener las siguientes mejoras:

- **Se facilita la prevención de posibles fallos** al poder detectar defectos y daños, gracias a las evaluaciones minuciosas de la integridad estructural y el estado operativo de las instalaciones.
- **Toma de decisiones más ágil y precisa** al permitir la recopilación de los datos en tiempo real, y su análisis de forma automática o semi-automática, con programas o inteligencia artificial entrenados para la detección de defectos o anomalías.
- **Mejor planificación del mantenimiento preventivo** necesario, y mayor optimización de los recursos disponibles, gracias a la detección temprana de potenciales problemas.



Ilustración 9. Inspección de un aerogenerador con métodos tradicionales
[Imagen generada con IA].

Algunos ejemplos de los numerosos campos en los que ya se realiza inspección de infraestructuras con UAS son los siguientes:

- Equipos e instalaciones industriales de todo tipo.
- Edificios y monumentos (incluido patrimonio histórico).
- Tendidos eléctricos de alta tensión.
- Oleoductos, gasoductos, viaductos y acueductos.
- Vías de ferrocarril.
- Carreteras y puentes.
- Centrales de energías renovables (presas, paneles solares, aerogeneradores...).
- Plataformas petroleras en alta mar.
- Torres de telecomunicaciones.

- Explotaciones mineras.
- Seguimiento de proyectos de construcción.
- Medida del espesor de elementos de acero, como pueden ser los cascos de grandes embarcaciones.

Según un informe publicado por Optelos⁷, en el primer trimestre de 2023 ya se estimaba que el 16% de las principales empresas de petróleo y gas a nivel mundial había integrado UAS en sus protocolos de inspección visual, y otro 74 % mostraba su intención de integrarlos en el futuro.



Ilustración 10. Inspección de centrales nucleares.
[Imagen generada con IA].

Existen distintos tipos de UAS con los que realizar la inspección, en función de cómo sea ésta. Si requiere realizar movimientos verticales, o que el UAS se detenga en vuelo en un punto fijo, se recurrirá al tipo multirrotor (cuadricópteros, hexacópteros...) que tienen una gran maniobrabilidad.

Los UAS de ala fija, con mayor autonomía y velocidad, son más aptos para tareas que requieran realizar un recorrido lineal extenso, como en acueductos, oleoductos, líneas eléctricas, líneas de ferrocarril, etc.

En España, en el año 2024, existen numerosas empresas que ofrecen servicios de inspección con UAS en una variedad de sectores, como la energía, la agricultura, la construcción, la minería, las infraestructuras o grandes instalaciones, entre otros.

7. Oil and Gas Drone Inspections: Accelerating Asset Management (<https://optelos.com/oil-and-gas-drone-inspection/>)

3.5. Agricultura de precisión

Los procedimientos tradicionales para la planificación, gestión y seguimiento de los cultivos solían utilizar medios y técnicas íntimamente ligadas al propio terreno. Esto en muchos casos podía hacerlos ineficientes, lentos y costosos. Para mejorar la eficiencia en la producción se ha desarrollado el concepto de agricultura de precisión. La agricultura de precisión es un enfoque agrícola que utiliza tecnologías avanzadas y datos detallados para optimizar la gestión de los cultivos y mejorar la productividad. Requiere la recopilación y análisis de gran cantidad de datos, y ahí es donde los UAS son particularmente útiles.

Algunos de los campos en los que ya se está haciendo uso de los UAS para la agricultura de precisión son:

- **Características del terreno:** Conocer determinadas propiedades del suelo, como la textura (mediante imágenes térmicas) o la adecuación al tipo de planta que se quiere sembrar, anticipando las labores necesarias.
- **Contabilización de plantas:** Las imágenes obtenidas permiten contabilizar el número de tallos en una plantación.
- **Gestión y seguimiento de cultivos:** La toma de datos e imágenes facilita el conocimiento del estado del cultivo facilitando su seguimiento.
- **Cálculo de índices de vegetación⁸:** A partir de los datos de cámaras multiespectrales. Son indicativos del vigor o estado de salud de la planta, e incluso del estado de maduración de un fruto.
- **Detección de plagas o enfermedades:** Las imágenes térmicas obtenidas son fundamentales para detectar este tipo de problemas a tiempo.
- **Detección de malezas:** Su detección mediante imágenes es el primer paso para su posterior tratamiento y eliminación.
- **Fumigación/Fertilización:** Distribución más uniforme y controlada del producto sobre los cultivos, en zonas determinadas, con el consiguiente ahorro en pesticida y mejora de la sostenibilidad medioambiental.
- **Siembra:** Dejando caer desde el UAS unos recipientes que son liberados a intervalos regulares y se rompen al impactar con el suelo, dispersando las semillas de forma controlada.

- **Monitorización del riego:** Las imágenes multiespectrales y térmicas permiten conocer la humedad del terreno, e identificar áreas con posibles problemas de hidratación.
- **Monitorización de la madurez de los cultivos:** Las imágenes visuales e infrarrojas permiten monitorizar el estado de madurez y determinar el momento de la cosecha.
- **Monitorización de la cobertura de residuos:** Las imágenes térmicas permiten evaluar la cobertura de residuos en los campos de cultivo, que les sirve de protección.
- **Monitorización de los sistemas de drenaje:** Es posible medir las diferencias de temperatura en un campo mediante imágenes térmicas, e identificar posibles problemas de drenaje.
- **Inspección de instalaciones de riego:** Se pueden detectar fallos en ellas, y actuar en consecuencia para evitar problemas de riego.
- **Otras aplicaciones** como la prevención, seguimiento y extinción de incendios; seguimiento de la erosión; caracterización hidrológica; cubicación y análisis de masas forestales; e incluso, ya dentro del campo de la ganadería, el pastoreo del ganado.



Ilustración 11. UAS en tareas de monitorización de cultivos. [Imagen generada con IA].

8. Los índices de vegetación son valores que se calculan a partir de fórmulas para medir y analizar el estado de la vegetación. Se basan en la medición de la radiación reflejada por la vegetación en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

Además de las ventajas generales del uso de UAS, en la agricultura de precisión se dan las siguientes:

- **Mejor gestión de los cultivos:** Facilita la gestión de la plantación, el monitoreo de malezas y el daño causado por plagas, pudiendo actuar con mayor antelación y rapidez.
- **Mayor rendimiento:** Contribuye a gestionar los cultivos, suelo, fertilizantes y riego de manera más eficiente, y a una mejor toma de decisiones. Se mejora el rendimiento de los cultivos, la productividad agrícola y la rentabilidad de los sistemas agrícolas.
- **Mayor precisión:** Un vuelo más preciso permite una distribución homogénea del fertilizante, agua o pesticida para la fumigación, el riego o la fertilización.



Ilustración 12. UAS capturando datos para agricultura de precisión. [Imagen generada con IA].

El empleo de los UAS en la agricultura también se enfrenta a algunas limitaciones o desafíos específicos:

- **Autonomía y Alcance:** El tiempo de vuelo de los UAS todavía es bastante limitado, normalmente inferior a una hora, y pueden cubrir áreas relativamente pequeñas. En caso de campos de cultivo muy extensos, se requiere disponer de diversas baterías de repuesto, o bien, operar con varios UAS para repartir el trabajo a realizar.

- **Precisión y Resolución:** La mayoría de las cámaras térmicas tienen una resolución limitada a 640 x 480 píxeles, lo que en determinadas ocasiones puede no ser suficiente para detectar detalles pequeños en los cultivos. Incluso sería de utilidad una mayor precisión para detectar pequeñas diferencias de temperatura.
- **Robustez frente a factores externos:** Las imágenes de las cámaras térmicas pueden verse afectadas por factores externos como la humedad atmosférica, la distancia de toma de datos, y otras fuentes de radiación térmica, tanto emitida como reflejada. Por ello, se antoja crítica la calibración de los sensores térmicos.

Para aplicaciones de los UAS en el campo de la agricultura de precisión, se utilizan tanto UAS de ala fija como de tipo multirrotor.

Los UAS de ala fija, debido a sus características, se utilizan para realizar tareas que no requieran realizar vuelo vertical, a muy baja velocidad, o vuelo a punto fijo. Por su mayor autonomía y velocidad, son más apropiados para realizar tareas en campos de cultivo dotados de una gran extensión de terreno. Una aplicación típica podría ser la fumigación con pesticidas o la distribución de fertilizante sobre unos cultivos de gran extensión. No obstante, se utilizan también para otros usos, como monitorización del riego, cálculo del índice de vegetación, toma de imágenes para valorar las características de un cultivo, etc.

Para el resto de las aplicaciones, es más habitual recurrir a UAS del tipo multirrotor (o incluso monorrotor). Por citar algunos ejemplos: la detección de plagas y enfermedades, la fumigación con pesticidas, la identificación de malas hierbas o el cálculo de índices de vegetación.

En España, ya existen varias empresas que ofrecen servicios con UAS aplicados a la agricultura, en actividades como el conteo de plantas, medición de clorofila, detección de necesidades hídricas, evaluación de la salud de la plantación, localización de malas hierbas, detección de plagas, peritajes y seguimiento de la fenología⁹ o fumigación.

9. La fenología trata de la observación y estudio de fenómenos biológicos relacionados con los cambios estacionales del ambiente físico, como la temperatura, la luz solar o las precipitaciones.



Ilustración 13. Operación de UAS en condiciones meteorológicas adversas. [Imagen generada con IA].

3.6. Mensajería

Actualmente, el transporte de mercancías se realiza por medio de aviones, barcos y camiones, que son adecuados para cubrir grandes distancias y transportar cargas pesadas. Estos medios no pueden ser sustituidos por pequeños UAS. Sin embargo, sí son adecuados para cubrir la fase final de entrega de la mercancía, lo que en inglés se conoce como “last-mile delivery” (entrega de última milla). Esta última fase del proceso abarca la entrega final; esto es, el traslado de un producto desde el almacén o centro de distribución hasta el destino final del cliente. La integración de esta aplicación dentro de la Movilidad Aérea Urbana se verá con más detalle en el capítulo 5.

Las empresas logísticas vieron en el uso de estas nuevas tecnologías una forma de mejorar su capacidad de respuesta durante la pandemia de la COVID-19. Los usos más habituales de los UAS para las tareas de mensajería son:

- Entrega de medicinas, vacunas y muestras de sangre.
- Reparto de comida a domicilio.
- Suministro de mercancías de poco peso.
- Entrega de documentación.

Los métodos tradicionales para realizar las entregas de última milla eran los helicópteros (para el traslado de

mercancías o suministros médicos), camiones, furgonetas, motocicletas, bicicletas o patinetes. Frente al uso de estos medios tradicionales, los UAS proporcionan las ventajas siguientes:

- Reducción en los tiempos de entrega.
- Reducción de los costes de la entrega.
- Capacidad para llevar el servicio a zonas o destinos con una deficiente red de comunicaciones o de difícil accesibilidad.
- Reducción del impacto ambiental.

Sin embargo, también tiene asociados una serie de desafíos, entre los que cabe destacar:

- La gestión de las rutas en entornos multi UAS con uno o más de un centro de distribución.
- Optimización de las cargas.
- Gestión de las baterías.
- Ciberseguridad.

El tipo de UAS usado para estos servicios depende de la aplicación concreta ya que esta condicionará las características del vuelo. Para la entrega de última milla, los UAS de tipo multirroto son muy apropiados para entregas en áreas urbanas densas debido a su maniobrabilidad y estabilidad, y los de ala fija para cubrir distancias más largas a mayor velocidad fuera de áreas urbanas.



Ilustración 14. Transporte de paquetería. [Imagen generada con IA].

3.7. Fotografía y Filmación

Hasta la aparición de los UAS, este tipo de aplicaciones se realizaban mediante cámaras en grúas o con el apoyo de aeronaves tradicionales como helicópteros, aviones o avionetas.

Probablemente sea esta una de las aplicaciones que mayor desarrollo y expansión ha experimentado con el uso de UAS, abarcando la grabación de escenas en la industria cinematográfica, la fotografía aérea, la creación de contenidos multimedia o la retransmisión de eventos.

En la industria cinematográfica, los UAS se utilizan para grabar escenarios al aire libre a gran escala, vistas complementarias de varios puntos de la acción, seguimiento de los actores, o grabación en interiores y exteriores de edificios. Todos ellos permiten la formación de panoramas dinámicos y tomas novedosas (multivista y de 360°).

Para los medios de comunicación, los UAS ofrecen una opción muy atractiva para la cobertura en vivo de eventos de todo tipo, como deportivos, noticias relacionadas con el clima y los desastres naturales, así como la cobertura de noticias en áreas particularmente difíciles de alcanzar.

En ambos campos los UAS pueden ofrecer además una ayuda indirecta como fuentes dinámicas de luz, para proporcionar iluminación a una escena en constante movimiento.

Los UAS han revolucionado también la fotografía aérea, ofreciendo una amplia gama de aplicaciones en diversos campos. Adicionalmente a algunos de los usos descritos en otros apartados de este capítulo, como topografía/fotogrametría, agricultura de precisión, inspección de infraestructuras, etc., también se utilizan para capturar imágenes y videos de paisajes, eventos, propiedades inmobiliarias o sitios arqueológicos.

Como ventajas de los UAS específicas para estas aplicaciones cabe mencionar las siguientes:

- Permiten grabar desde perspectivas únicas y difíciles de alcanzar, o incluso peligrosas, gracias a su capacidad de volar a bajas altitudes y en espacios reducidos.
- Son muy eficientes en términos de tiempo y coste, frente a los medios tradicionales, por lo que son ideales para proyectos de menor escala o que requieren la toma de imágenes frecuente.

- La capacidad de programación de los vuelos y su automatización también permite realizar la toma de imágenes de forma repetitiva, facilitando el seguimiento de cambios en el tiempo.



Ilustración 15. UAS para filmación [Imagen generada con IA].

En España existen numerosas empresas que ofrecen servicios de filmación y fotografía aérea con drones, en ámbitos como cine y televisión, publicidad, eventos deportivos, turismo, inmobiliario, foto y vídeo corporativo y de empresa, etc.

3.8. Seguridad

Algunas de las labores que realizan las fuerzas y cuerpos de seguridad del Estado (FFCCSE) para garantizar la seguridad ciudadana son:

- **El control fronterizo:** en España se realiza a través de los emplazamientos físicos destinados para ello. Dichas fronteras terrestres están vigiladas por la Policía Nacional y/o Guardia Civil que, con su labor de patrullaje, inspección de vehículos y personas, previenen la entrada ilegal de personas o mercancías en el país.
- **Vigilancia especial de actividades multitudinarias:** la policía se encarga de vigilar el mantenimiento del orden en el desarrollo de espectáculos y otros tipos de actividades multitudinarias, de acuerdo con lo dispuesto en el Real Decreto 2816/1982, de 27 de agosto. Los medios usados son principalmente el

patrullaje y la presencia policial (por medios terrestres o aéreos) y el empleo de cámaras de vigilancia para supervisar la actividad y detectar comportamientos irregulares. Dichas cámaras pueden estar conectadas a centros de monitorización en tiempo real donde los operadores pueden controlar la situación y tomar medidas según sea necesario.

Del mismo modo, las empresas privadas de seguridad realizan el control y vigilancia de instalaciones mediante el uso de cámaras, sensores de movimiento, patrullas de seguridad privada, control de accesos, etc.



Ilustración 16. Operaciones de seguridad.
[Imagen generada con IA].

La aplicación de UAS en el ámbito de la seguridad está experimentando una rápida expansión, siendo utilizados para mejorar la eficiencia en las tareas de seguridad anteriores. Para este tipo de aplicaciones se emplean UAS de gran autonomía equipados con cámaras térmicas, cámaras de alta resolución, sensores de movimiento y sistemas de detección de obstáculos e incluso sistemas de reconocimiento facial de personas no autorizadas para acceder a la zona a supervisar. Todo ello mejora la eficiencia de las labores de vigilancia en zonas remotas, abiertas, interiores o zonas residenciales. Pueden proporcionar una respuesta rápida ante cualquier actividad sospechosa, ayudando a la prevención de robos y otros actos delictivos, ya que permite monitorizar grandes áreas de forma remota y en tiempo real.

Una de las aplicaciones con mayor relevancia en la seguridad es la investigación de accidentes, ya que los UAS equipados con sistemas LIDAR son capaces de obtener fotografías de alta calidad del lugar de los hechos, así como buscar pruebas mediante grabaciones de video para reconstruir la escena del accidente.

En cuanto a las tendencias de investigación, en el documento “Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges” del New Jersey Institute of Technology, se detalla cómo la inteligencia artificial y los nano-sensores mejorarán la vigilancia con UAS. Se van a seguir priorizando ciertas características como el tamaño reducido, la alta resolución de la fotografía y el bajo consumo de energía que permitirá una operación prolongada y la realización de tareas más complejas. La apuesta por reducir el tamaño supondrá rebajar los ataques físicos y lograr un patrullaje menos visible y más eficiente.

A pesar de los avances tecnológicos, y del cada vez más desarrollado marco normativo, todavía existen desafíos en términos de seguridad y privacidad. Se está trabajando activamente para abordar estos retos.

También se ha estudiado cómo el uso de UAS puede afectar a la intimidad y a las libertades civiles y se destaca que los mecanismos reguladores actuales no contemplan los aspectos relacionados con ello.

En la misma línea, en el proyecto PRESCIENT de la Comisión Europea se aborda la problemática de que las nuevas tecnologías de vigilancia, como los UAS, pueden afectar al comportamiento y acciones de la vida privada.

Por lo general, en este sector, gran parte de la operativa se llevará a cabo con UAS de ala rotatoria, si bien los UAS de ala fija proporcionan mayor autonomía, velocidad máxima y rango de transmisión para aquellas aplicaciones que así lo requieran en el entorno de la seguridad y vigilancia.

En España, existen empresas que desarrollan su actividad en el campo de aerovigilancia y seguridad, algunas de ellas ofreciendo servicios destinados a la seguridad privada, industrial, pública e institucional (incluso seguridad aeroportuaria), y otros fabricando plataformas y helicópteros UAS para operaciones de vigilancia en áreas estratégicas, misiones de seguridad marítima, control fronterizo, observación avanzada, etc.

3.9. Topografía y fotogrametría

La topografía es la ciencia que estudia y representa gráficamente la superficie de la Tierra, y sus características, ya sean naturales o modificadas por la acción del ser humano. Así, por medio de la medición y el mapeo de la superficie permite obtener información detallada y precisa sobre las características del terreno, obteniendo datos tales como coordenadas geográficas, distancias, elevaciones o pendientes.

La fotogrametría es una técnica de medición utilizada en la topografía orientada a obtener mediciones precisas a partir de un mosaico de fotografías que se solapan, permitiendo generar mapas 2D precisos o modelos 3D del área u objeto de interés.

En topografía, para llevar a cabo estas mediciones, tradicionalmente ha sido necesario el uso de equipos terrestres y métodos manuales, laboriosos y que requieren mucho tiempo. Así, se tenía que contar con personal especializado y cualificado, y con herramientas tales como las siguientes:

- **Estaciones totales:** Son instrumentos que, combinando un teodolito electrónico y una unidad de medición de distancia (EDM), permiten medir ángulos y distancias desde un punto fijo.
- **Niveles topográficos:** Por medio de la medición de la diferencia de altura entre puntos permiten determinar la elevación del terreno.
- **GPS¹⁰ de alta precisión:** Receptores de señal GPS que proporcionan datos de ubicación muy precisos.
- **Fotogrametría aérea:** Toma de fotografías desde aviones tripulados, que tras el correspondiente procesamiento, permite la creación de mapas y modelos 3D. Obviamente, se trata de un método costoso y logísticamente complejo.

El tiempo necesario para realizar un levantamiento topográfico depende de muchos factores, como pueden ser la complejidad del terreno, su accesibilidad, las condiciones climatológicas, la necesidad de permisos, la disponibilidad de equipos y el número de personas para la toma de datos. A título ilustrativo, para un área rural extensa, podría llevar varios días o incluso semanas, con evidente margen de mejora.



Ilustración 17. Trabajos topográficos. [Imagen generada con IA].

La capacidad de los UAS para obtener información precisa y detallada sobre el terreno los hace muy prácticos para una gran variedad de aplicaciones relacionadas con la topografía y la fotogrametría, como las que se enumeran a continuación:

- **Cartografía:** Los UAS pueden volar sobre grandes extensiones y capturar imágenes aéreas para crear mapas topográficos, y modelos digitales del terreno y de elevación, resultando útiles para proyectos de planificación urbana y estudios geológicos.
- **Construcción:** La generación de modelos 3D del terreno proporciona una visión detallada y precisa del sitio de construcción, siendo importante para la planificación del proyecto y contribuyendo a su seguimiento, al ayudar a identificar posibles problemas y realizar inspecciones sin tener que interrumpir las actividades en marcha.
- **Agricultura de precisión** (ver apartado 3.5): Con la creación de mapas 3D detallados, los agricultores pueden monitorizar los campos y detectar problemas en el crecimiento de las plantas, permitiendo una gestión más eficiente de la plantación, y tomar decisiones más acertadas sobre temas como el riego, fertilización o cosecha.
- **Minería:** Los UAS son utilizados para mapear y monitorear minas a cielo abierto, calcular volúmenes de material extraído y gestionar la seguridad en el

10. Global Positioning System: sistema de posicionamiento global basado en satélites que proporciona información relativa a ubicación (coordenadas geográficas y altitud).

sitio. Su capacidad para volar en entornos peligrosos reduce el riesgo para los trabajadores y proporciona datos precisos para la planificación y operación.

- **Protección medioambiental** (ver apartado 3.1): Con diversos usos, como monitorear la erosión en la línea de costa o la deforestación en bosques o selvas, principalmente remotos. La disponibilidad de los datos recopilados por los UAS permite monitorizar ecosistemas sensibles, detectar cambios y planificar mejor las tareas de conservación.
- **Inspección de infraestructuras** (ver apartado 3.4): Inspección de puentes, carreteras y edificios. Con la fotogrametría con UAS se capturan imágenes detalladas, permitiendo la detección temprana de daños y la planificación de reparaciones.
- **Gestión de emergencias** (ver apartado. 3.3): En el caso de desastres naturales como terremotos, deslizamientos de tierras, etc. los UAS permiten en muy poco tiempo un mejor conocimiento de la zona afectada, y colaborar en el despliegue de emergencia y posterior reconstrucción de la zona.
- **Arqueología:** Documentar y analizar prospecciones arqueológicas de acceso complicado, siendo la generación de modelos 3D una técnica no invasiva que permite analizar la zona de interés sin causar daños, deteriorar o poner en riesgo el lugar.



Ilustración 18. Operación de UAS en arqueología.
[Imagen generada con IA].

Los UAS han revolucionado la topografía y la fotogrametría, proporcionando métodos más rápidos, precisos y seguros para la recolección de datos geoespaciales, permitiendo cubrir grandes áreas rápidamente y capturar datos en tiempo real, reduciendo significativamente el tiempo y el coste de la operación.



Ilustración 19. UAS capturando datos para cartografía digital.
[Imagen generada con IA].

Y ofrecen otras ventajas frente a los métodos tradicionales, adicionales a las generales del principio del capítulo:

- **Integración:** Los datos recopilados por los UAS se integran fácilmente con otras herramientas avanzadas, como los sistemas de información geográfica (GIS) o las aplicaciones CAD (Computer-Aided Design), agilizando así el flujo de trabajo, y permitiendo generar diversos productos, como modelos 3D o mapas de contorno.
- **Alta resolución:** Con las cámaras de alta resolución, y la capacidad de los UAS para volar a altitudes menores que una aeronave convencional, se obtienen imágenes con un elevado nivel de detalle, dando lugar a la creación de modelos 3D precisos y análisis detallados de las características del terreno.

A pesar de sus ventajas, el uso de UAS en topografía y fotogrametría presenta algún desafío, como los requisitos de procesamiento de datos. La gran cantidad de fotografías necesarias para la fotogrametría y la técnica de cálculo de distancias hace necesaria una gestión y procesamiento de grandes volúmenes de datos, que exige disponer de software especializado y una potente capacidad de procesamiento.

Existen varios tipos de UAS utilizados para la fotogrametría y la topografía:

Multirrotores: Versátiles y fáciles de maniobrar, ideales para áreas pequeñas o medianas y detalladas. Principalmente, son cuadricópteros o hexacópteros, que tienen una gran estabilidad.

Ala fija: Ideal para cubrir una gran extensión de terreno, con un vuelo más eficiente y capaces de llevar a cabo trabajos de gran envergadura con mayor rango de funcionamiento, velocidad y autonomía de vuelo.

VTOL (Despegue y Aterrizaje Vertical): Aeronaves híbridas que combinan las ventajas de los multirrotores y las alas fijas, con capacidad de despegar y aterrizar en vertical, y una gran autonomía, que los hace adecuados también para cubrir grandes extensiones. En un único vuelo pueden cubrir hasta 1000 hectáreas.

En España, existen actualmente varias empresas que realizan trabajos con UAS en este ámbito, orientados principalmente a la construcción de obra civil, cartografía, ortofotografía, arquitectura, geología y arqueología.

3.10. Otras aplicaciones

La industria de los UAS es relativamente reciente, y su utilización está en plena fase expansiva, surgiendo constantemente nuevas aplicaciones y usos.

Si bien se han citado los principales en los apartados anteriores, existen otros muchos, algunos de carácter muy específico: como sistema de relé de comunicaciones para casos de fallos de las torres de comunicaciones o donde no se puedan instalar éstas; para calibración del haz de los telescopios; diversos usos relacionados con la conservación del medio ambiente. Por su parte, algunos otros son de interés en el mundo aeronáutico o de aplicación aeronáutica, y así, empresas como ENAIRE y AENA están haciendo uso de UAS para calibración de radioayudas (ej. ILS), o inspección de pistas de aterrizaje de aeropuertos (detección de objetos o fauna en pista, comprobación de luces...) respectivamente.



Ilustración 20. Enjambre de drones. [Imagen generada con IA].

Aunque no constituyen una aplicación en sí mismos, sino que se pueden utilizar con diferentes fines (al margen del uso en el ámbito militar), conviene citar los enjambres de UAS, cuyo uso seguramente más conocido sean las exhibiciones o espectáculos visuales, en los que se utilizan un gran número de UAS que operan de forma combinada para crear coreografías aéreas impresionantes y juegos de luces sincronizados. No obstante, también han demostrado ser valiosos en aplicaciones de búsqueda y salvamento, agricultura de precisión, inspección de infraestructuras, etc.

CONCLUSIONES

La introducción de los UAS ha tenido un gran impacto en campos y sectores tan diversos como los descritos en este capítulo, con una penetración bastante acusada ya en ámbitos como la filmación y fotografía aérea, inspección de infraestructuras, agricultura de precisión, seguridad, búsqueda y salvamento, o topografía y fotogrametría. Existen otros campos con menor grado de implantación todavía, pero con mucho futuro por delante, como la mensajería, o la movilidad aérea urbana y las operaciones a gran altitud (estas dos últimas tratadas más adelante en capítulo propio).

Los UAS están proporcionando muchos beneficios en términos de costes, eficiencia, rapidez, seguridad y sostenibilidad medioambiental, lo que está facilitando que muchas empresas opten por realizar sus operaciones con este tipo de aeronaves. Además de las ventajas y retos enumerados en los apartados 1 y 2 y descritos a lo largo del apartado 3, el uso de UAS conlleva también la aparición de otras necesidades y problemáticas que aun necesitan desarrollo, como es lo relacionado con aspectos éticos, de privacidad o de seguridad.

Dron DJI Phantom en labores de pastoreo (Cortesía DELSAT Internacional Drones).



REFERENCIAS

1. "Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges"
2. "A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications"
3. "Remote Sensing Applications: Beyond Land-Use and Land-Cover Change"
4. The documentation of archaeological heritage through aerial photogrammetry and UAS-based LiDAR: the case study of the Espique valley (La Peza, Spain)" de este enlace
5. DIRECTIVA 2010/40/UE
6. Drones en Acción Humanitaria: Una Guía para el Uso de Sistemas Aerotransportados en Crisis Humanitarias"
7. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Search and Rescue Addendum to the National Search and Rescue Supplement to the International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual"
8. "Using a Search and Rescue Drone"
9. Oil And Gas Drone Inspections: Accelerating Asset Management. Optelos
10. A Guide to How Drones are Used for Inspections
11. Inspection using drone technology
12. How Drones Are Used for Infrastructure Inspection. Skydio
13. Drone Inspections. A Complete Guide
14. Conducting Safety Inspections by Drone. TRC Companies
15. Inspection Drones for Ensuring Safety in Transport Infrastructures
16. How Drones Are Used in Agriculture. Toll Uncrewed Systems
17. Croptracker. Drone Technology In Agriculture
18. Drones en la agricultura. Easy Drones
19. How agriculture drones can enhance production
20. Farm with A View. How Drone Technology Is Taking Agriculture to A New Level
21. Drones in Agriculture 10 ways UAVs are Shifting Agri-Tech Paradigm Drone Nodes
22. Last-Mile Drone Delivery: Past, Present, and Future
23. Drone-Aided Delivery Methods, Challenge, and the Future: Methodological Review
24. The Effective Solution of Last Mile Delivery by using Drone Delivery
25. The Present and Future of DroneDelivery

26. Amazon Air (aboutamazon.com)
27. Drones and Egnss for LOW aiRspace urbAN mobility. DELOREAN Project. CORDIS. European Commission (europa.eu)
28. Optimization-based planning of multi-UAV teams in aerial filming applications
29. High-level Multiple-UAV Cinematography Tools for Covering Outdoor Events
30. Autonomous Aerial Filming With Distributed Lighting by a Team of Unmanned Aerial Vehicles
31. AEROMEDIA. Servicios con Drones. Fabricación. I+D+i
32. Real Decreto 2816/1982, de 27 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General de Policía de Espectáculos Públicos y Actividades Recreativas
33. Understanding and Securing Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Services: A Comprehensive Tutorial
34. How Drones Help Law Enforcement
35. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications
36. <https://cordis.europa.eu/project/id/244779/reporting/es>
37. Homeland Security: Unmanned Aerial Vehicles and Border Surveillance
38. Unmanned aerial vehicles: A review
39. PAINTEC. Empresa de servicios y Drones profesionales
40. https://www.oneair.es/drones-arqueologia/#usar_drones_en_expediciones_arqueologicas_si_o_no
41. Uso de drones en topografía y cartografía. Atyges
42. <https://0mas000.com/que-es-la-topografia-y-para-que-sirve/>
43. <https://excavacionesgrasa.com/que-es-la-topografia-y-cuales-son-sus-aplicaciones/>
44. <https://datum-sl.com/que-es-la-topografia-y-cual-es-su-importancia/>
45. <https://geogest.es/conceptos-basicos-topografia/>
46. <https://uavlatam.com/cartografia-con-drones-que-es-ventajas/>
47. <https://pirodrone.com/es/fotogrametria-con-drone/>
48. A Comprehensive Beginner's Guide to Drone Photogrammetry. <https://www.jouav.com/blog/drone-photogrammetry.html>
49. Your Complete Guide to Drone Photogrammetry. <https://www.datumate.com/blog/your-complete-guide-to-drone-photogrammetry>
50. Mastering drone photogrammetry: complete guide to high-quality surveys. <https://wingtra.com/drone-photogrammetry/>.
51. The Ultimate Beginner's Guide To Drone Photogrammetry. <https://thedronelifenj.com/drone-photogrammetry-beginner-guide>
52. Study on the Key Technology and Application of UAV Surveying and Mapping Data Processing
53. UAV Coach: Drone Photogrammetry: What It Is, How to do It, and the Top Photogrammetry Drones on the Market (<https://uavcoach.com/drone-photogrammetry/#guide-2>)
54. <https://airdroneview.com/trabajos/arqueologia-y-topografia/>
55. <https://airdroneview.com/trabajos/obra-civil-con-drones/>
56. <https://sgdrones.es/seguimiento-de-obras-con-drones/>
57. <https://sgdrones.es/topografia-con-drones-cartografia-3d-y-fotogrametria/>
58. <https://proesza.com/topografia/>
59. <https://aerialproductions.es/fotogrametria-drones/>

Dron sobrevolando la ciudad de Londres en un servicio de paquetería [Fuente: <https://www.wing.com>].



Escenarios de Operación de los UAS civiles

**Susana Durán Vizuite
Esther Nistal Cabañas
Carlos H. Prieto Pedrosa
Olga Clara Aranda García
Raul García González
Pedro J. García Moreno
Javier Rosano de Lucas
Enrique Contreras Alonso
Cesar Ruiz Hurtado
María Saíz Coronado
Laura Parga Gata**

Los sistemas aéreos no tripulados (UAS) tienen que desarrollar sus operaciones en el mismo entorno en el que vuela el resto de aeronaves: el espacio aéreo. En este capítulo, se ofrece una visión general de los elementos que forman parte de ese espacio aéreo, que a simple vista puede parecer vacío, pero que está repleto de usuarios, estructuras, regulaciones y servicios específicos.

En Europa, la regulación de UAS ha avanzado significativamente, con normativas que establecen categorías de operación según el nivel de riesgo. Desde vuelos de bajo impacto hasta aquellos que requieren certificaciones complejas, los UAS están abriendo un abanico de posibilidades en sectores como logística, vigilancia y movilidad urbana.

Para garantizar la seguridad en un espacio aéreo compartido con aeronaves tripuladas, se han desarrollado conceptos innovadores como el U-Space, un ecosistema de servicios digitales que permite gestionar el tráfico de drones de forma automatizada y eficiente. Este enfoque no solo asegura una operación coordinada, sino que también facilita la convivencia entre los diferentes usuarios del cielo, incluso en áreas de alta densidad de tráfico.

Uno de los mayores desafíos de esta integración es compatibilizar las reglas de vuelo tradicionales con las necesidades de los UAS. Mientras que las operaciones actuales dependen en gran medida de la segregación del espacio aéreo, las iniciativas futuras, como las Reglas de Vuelo Digitales (DFR), buscan automatizar y flexibilizar las operaciones, permitiendo una interacción más fluida y segura entre todos los actores.

Además de las operaciones convencionales, los UAS de gran altitud están ganando protagonismo. Estos sistemas, capaces de volar en la estratosfera durante largos períodos, tienen aplicaciones en telecomunicaciones y monitoreo ambiental, destacando por su potencial para mejorar la conectividad y aportar soluciones sostenibles.

La evolución de los UAS no solo representa un cambio tecnológico, sino también una transformación en la manera de gestionar el espacio aéreo. Con el desarrollo de infraestructuras avanzadas, servicios especializados y marcos regulatorios adaptados, estos sistemas están redefiniendo el futuro de la aviación, ofreciendo oportunidades únicas para la innovación y el progreso en un mundo cada vez más conectado.

Este nuevo horizonte no está exento de retos, pero su implementación promete un impacto positivo en múltiples ámbitos, desde la seguridad hasta la sostenibilidad. Los UAS, en definitiva, están llamados a ser protagonistas en el cielo del mañana.



1. CONTEXTO NORMATIVO EUROPEO Y NACIONAL DE LOS UAS CIVILES

La llegada de los UAS al ámbito aeronáutico, con características muy distintas a las de las aeronaves tripuladas tradicionales, y su uso cada vez más extendido en una variedad creciente de aplicaciones, hizo imprescindible desarrollar una normativa específica para regular su operación.

Así, EASA asumió las competencias a nivel europeo y ha desarrollado el marco normativo aplicable en los distintos ámbitos de la operación UAS. Este marco se fundamenta en unos reglamentos base para cada ámbito. A partir de ellos se publican otros reglamentos adicionales que los completan y material adicional que aclara procedimientos y guían en la interpretación común de cómo deben aplicarse para lograr una implantación armonizada en Europa.

1.1. El uso de los UAS civiles

El **Reglamento 2019/947** [19], afecta a todos los UAS civiles en el espacio aéreo de la Unión Europea, independientemente de su uso o tamaño. Este reglamento crea un marco regulatorio integral para la operación de UAS civiles en el espacio aéreo europeo, facilitando su integración segura mediante el uso de tecnología avanzada, formación y evaluación de riesgos ajustada al tipo de operación.

Para ello, establece disposiciones detalladas para su operación, así como también para el personal, incluidos los pilotos a distancia, y las organizaciones que participen en dichas operaciones. Este reglamento define tres categorías de operación. En el apartado 2 de este capítulo, se apuntan los requisitos y limitaciones operacionales para cada una de ellas y los requisitos de competencia y edad que deben cumplir los pilotos a distancia en función de la categoría de que se trate.

1.2. Los operadores de UAS civiles de terceros países

El **Reglamento Delegado 2019/945** [18], establece un marco normativo detallado para el diseño, la fabricación, la comercialización y la distribución de UAS civiles que van a ser utilizados con arreglo a las normas y condiciones de operación definidas en el Reglamento 2019/947. También define en qué condiciones los UAS, su diseño, producción y mantenimiento, están sujetos a certificación. Se enfoca

en la seguridad técnica de los sistemas de aeronaves no tripuladas, impone normas detalladas sobre los fabricantes y operadores, e incluye disposiciones especiales para operadores de terceros países que deseen operar en Europa.













DO	DO NOT
 <p>Make sure you are adequately insured</p>	 <p>Do not fly over large group of people</p>
 <p>Check for no-fly zones and any limitations in the area where you want to fly</p>	 <p>Do not fly higher than 120m from the ground</p>
 <p>Keep the drone in sight at all times</p>	 <p>Do not fly near aircraft & in the proximity of airports, helipads or where an emergency response effort is ongoing</p>
 <p>Maintain a safe distance between the drone and people, animals and other aircraft</p>	 <p>Respect other people's privacy</p>
 <p>Inform your national aviation authority immediately if your drone is involved in an accident that results in a serious or fatal injury to a person, or that affects a manned aircraft</p>	 <p>Do not use the drone to carry dangerous goods or to drop material</p>
 <p>Operate your drone within the limits defined in the manufacturer's instructions</p>	 <p>Do not modify your drone. Only software uploads recommended by the drone manufacturer are</p>

Ilustración 1. Normas al volar un dron que se considera juguete (menor de 250 g). [Fuente: <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/drone-christmas>]

1.3. La definición del U-Space

El **Reglamento de Ejecución 2021/664** [20] es el eje del paquete normativo que la Comisión Europea publicó en 2021 para regular la gestión del U-Space, por ello se le conoce como “**Reglamento U-Space**”:

¿Qué es U-Space? Es el conjunto de servicios y procedimientos destinados a la integración segura de UAS civiles en el espacio aéreo controlado y no controlado de la Unión Europea.

El *Reglamento U-Space* tiene como objetivo facilitar la coexistencia de las aeronaves tripuladas y no tripuladas de manera eficiente y segura, especialmente en áreas con una alta densidad de tráfico de UAS, apoyando el desarrollo del sector. Los servicios que prevé facilitarán que las operaciones de drones puedan gestionarse digitalmente y en tiempo real mediante un sistema automatizado de gestión del tráfico en las partes de espacio aéreo que se designen a tal efecto. El reglamento se ocupa también de las responsabilidades de los proveedores de servicios U-Space, los operadores de UAS y de las autoridades nacionales de aviación.

Este reglamento base se complementó con los reglamentos de ejecución 2021/665 [REF 21] y 2021/666 [REF 22], que incorporan los requisitos y obligaciones de los proveedores de servicios de navegación aérea y de la aviación tripulada en los espacios aéreos U-Space, preparando la infraestructura para la plena integración del U-Space. En concreto, el Reglamento 2021/665 se centra en los requisitos para los proveedores GTA/SNA para el caso de que un U-Space se sitúe dentro de un volumen de espacio aéreo controlado y el Reglamento 2021/666 introduce requisitos para la aviación tripulada en el caso de que operen dentro de un espacio U-Space fuera de un espacio aéreo controlado.

En los próximos apartados se aclarará con mayor detalle qué es el U-Space y todo lo que implica.

1.4. La aeronavegabilidad de los UAS

Como se verá en el apartado 2 de este capítulo, hay un tipo de operaciones de UAS civiles que se considera que podrían conllevar un riesgo relevante no mitigado por las medidas operacionales, tecnológicas o de limitaciones operativas que caracterizan a las operaciones en categoría abierta o en escenarios estándar predefinidos. Por ello, por norma general, para poder llevarlas a cabo es necesario realizar una evaluación de riesgos y recibir la autorización por parte de la autoridad competente; son operaciones que se denominan de categoría específica. El nivel de robustez general requerido a los distintos objetivos de seguridad operacional se establece en seis escalones progresivos (SAIL I a VI). Para velar por la seguridad operativa y el mantenimiento adecuado de los UAS civiles que operan en esta categoría en niveles de SAIL V o VI de forma general en la UE, y al mismo tiempo para lograr su integración segura con las operaciones aéreas civiles, se publicó el **Reglamento 2024/1107** [REF 23]. En él se establecen procedimientos administrativos comunes y requisitos técnicos que garantizan el mantenimiento de la aeronavegabilidad de los UAS destinados a realizar operaciones en la categoría específica, y todos los constituyentes que puedan llevar instalados. Además, establece los requisitos que deben cumplir las organizaciones que participen en el mantenimiento de la aeronavegabilidad de estos UAS y de las partes constitutivas que tienen instaladas. Para niveles menores de SAIL se establecen requisitos proporcionales a la robustez frente a una pérdida de control que sea requerida

El **Reglamento 2024/1109** [REF 24], que complementa al anterior, establece las normas y los procedimientos que deben aplicar las autoridades competentes para evaluar el cumplimiento de los requisitos de mantenimiento de

la aeronavegabilidad establecidos en el mencionado Reglamento. Trata también sobre cómo debe desarrollarse la reacción inmediata ante un problema de seguridad. EASA debe proceder con la emisión de recomendaciones o medidas correctoras que deban tomarse; y las autoridades competentes de cada país deberán trabajar para adoptarlas.

1.5. Particularidades normativas españolas

Recientemente, se ha actualizado el marco normativo nacional específico para los UAS civiles en línea con los cambios surgidos a nivel europeo. El nuevo **Real Decreto 517/2024** [REF 13], en sustitución del Real Decreto 1036/2017 [REF 14], se desarrolla con las directrices de la Unión Europea y enmienda la normativa nacional que lo requería. Con él se cubren aspectos que la regulación europea deja a competencia o discreción de cada Estado miembro para que puedan ajustarse a las necesidades nacionales. Además, se dota a las actividades No EASA civiles de un marco análogo al marco EASA.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS OPERACIONES DE UAS CIVILES

De acuerdo con el Reglamento 2021/947, “toda persona física o jurídica que utilice o tenga intención de utilizar uno o varios UAS” se considera operador de UAS.

Los operadores de UAS se registrarán:

- a. cuando utilicen, en la categoría «abierta», cualquier aeronave no tripulada:
 - i. con una MTOM de 250 g o más, o que, en caso de colisión, pueda transferir a un ser humano una energía cinética superior a 80 julios;
 - ii. equipada con un sensor capaz de capturar datos personales, salvo que sea conforme con la Directiva 2009/48/CE.
- b. cuando utilicen una aeronave no tripulada de cualquier masa en la categoría «específica»

Los requisitos aplicables, en los casos más frecuentes, que debe cumplir una persona física o jurídica, el piloto que pretenda volar un UAS civil en Europa, y el propio sistema UAS, son:

- para los operadores que sean personas físicas, tener como mínimo 16 años;
- registrarse como operador en la AESA;

- formarse como piloto de UAS y obtener la acreditación correspondiente;
- disponer de un seguro de responsabilidad civil; y
- equipar al UAS con *Direct Remote Identification (DRI)*.

Asimismo, también se exige un certificado de aeronavegabilidad del UAS para SAIL V, VI u operaciones en categoría certificada.

Puesto que son muchas y muy diferentes las características de las aeronaves y las operaciones que realizan los UAS civiles, actualmente, la normativa europea diferencia los UAS en tres **categorías** dependiendo del nivel de riesgo de la operación; categorías **abierta, específica y certificada**.



Ilustración 2. Categorías de operación y clases de UAS. [Fuente: https://www.seguridadaaerea.gob.es/sites/default/files/_Formacion.temario.completo.Ed12.pdf]

Aunque hay una serie de requisitos comunes, para poder volar un UAS civil en Europa, la mayoría dependen de la categoría de la operación que se realice. En los siguientes apartados se explican las tres categorías de operación. Pero antes de describir las categorías es necesario señalar que existen tres formas de volar un dron.

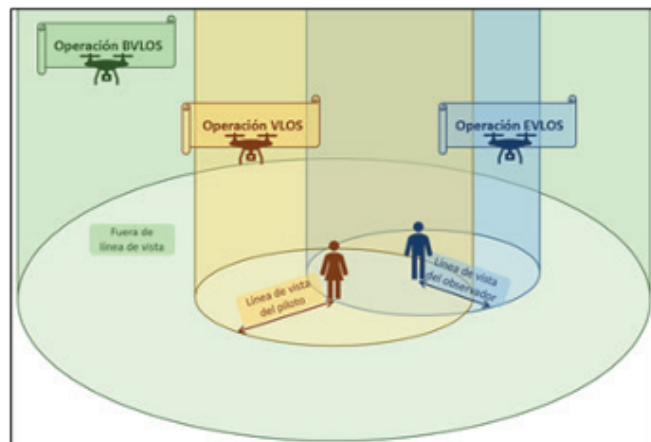


Ilustración 3. Diferencia gráfica de las operaciones VLOS, BVLOS con observadores y BVLOS [Fuente: elaboración propia]

- **VLOS:** Si el piloto remoto vuela el dron dentro de su alcance visual, esto es, a una distancia de la aeronave desde la cual pueda verla continuamente sin ayuda. A este tipo de vuelo se le conoce como VLOS, por las siglas en inglés: “Visual Line Of Sight”.
- **BVLOS:** Cuando la aeronave vuela fuera del alcance visual tanto del piloto como de un posible observador. A esta forma de vuelo se la conoce como BVLOS, por sus siglas en inglés “Beyond VLOS”.
- **BVLOS con observadores:** Cuando el piloto remoto del dron opera dentro de su propio alcance visual o del de un observador, con el que se mantiene en comunicación directa.

El nivel de los requisitos que se exige a la operación en cada categoría depende de cuál de estas tres formas de vuelo se utilicen para operar el UAS.

2.1. Categoría abierta

Engloba las operaciones que presentan **bajo riesgo debido a sus limitaciones operacionales**, por tanto, se garantiza la seguridad siempre que el operador del dron civil cumpla con los requisitos pertinentes para su operación prevista. Puesto que los riesgos operativos se consideran bajos, a diferencia de lo que ocurre para otras categorías, no se requiere que el operador reciba una autorización previa al vuelo ni que haga una declaración operacional para explicar su misión.

Esta categoría se divide, a su vez, en tres subcategorías, denominadas A1, A2 y A3. Cada una con distintas limitaciones operacionales, requisitos para el piloto remoto y requisitos técnicos aplicables a la propia aeronave. A grandes rasgos, en la subcategoría A1 se permite el vuelo sobre personas, pero no sobre concentraciones de personas, en la A2 se permite el vuelo cerca de personas y en la A3 el vuelo debe ser lejos de personas.

	Operaciones	Clases de UAS permitidos
A1	No volar sobre personas.	C0 , con masa menor a 250g. C1 , con masa menor a 900g.
A2	Se puede volar cerca de personas, a distancias seguras (por defecto: 30m; y, con el modo de baja velocidad: 5m).	C2 , con masa menor a 4kg.
A3	No volar cerca de personas Mantener a 150m de zonas residenciales, comerciales, industriales y recreativas.	C2 C3 , con masa menor a 25kg. C4

Ilustración 3. Diferencia gráfica de las operaciones VLOS, BVLOS con observadores y BVLOS [Fuente: elaboración propia]

Teniendo esto en cuenta, para que una operación pueda ser considerada de bajo riesgo, o, lo que es lo mismo, en la categoría abierta, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- el UAS pertenece a una de las clases establecidas en el Reglamento Delegado 2019/945 (C0, C1, C2, C3 o C4), es de construcción privada o ha sido introducido en el mercado antes del 1 de enero de 2023, o en subcategoría A1, la MTOM¹ (masa máxima al despegue) es menor de 250 g o, en subcategoría A3, la MTOM es menor a 25 kg;
- la MTOM es inferior a 25 kg;
- el piloto remoto garantiza que el UAS se mantiene a una distancia segura de las personas y que no vuela sobre concentraciones de personas;
- se opera en VLOS, salvo cuando vuela en modo sígueme o se opere en BVLOS con observadores;
- la altura máxima de vuelo son 120 m. En concreto, durante el vuelo el UAS no se alejará más de 120 m del punto más próximo de la superficie terrestre, salvo cuando sobrevuela un obstáculo; y
- durante el vuelo, la aeronave no tripulada no transportará mercancías peligrosas ni dejará caer ningún material.

WHAT TYPE OF DRONE CAN I FLY?						
Operation			Drone Operator / pilot			
C-Class	Max Take off mass	Subcategory	Operational restrictions	Drone Operator registration?	Remote pilot qualifications	Remote pilot minimum age
Privately build	<250g	A1 Not over assemblies of people	Operational restrictions on the drone's use apply (follow the QR code below)	Yes No if toy or not fitted with camera/sensor	Read user's manual	No minimum age (certain conditions apply)
legacy < 250g						
C0	<900g	A1 Can also fly in subcategory A3				
C1						
C2	<4kg	A2 Fly close to people Can also fly in subcategory A3	Yes	Check out the QR code below for the necessary qualifications to fly these drones	16	
C3	<25kg	A3 Fly far from people				
C4						
Privately build						
Legacy drones (art 20)						

Ilustración 5. Categorías de operación de drones. [Fuente: <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/drone-christmas>]

2.2. Categoría específica

La categoría específica de UAS se enfoca en operaciones con un **riesgo mayor al de la categoría abierta**, como volar drones de más de 25 kg, realizar vuelos BVLOS, superar los 120 m de altitud o efectuar lanzamientos de material. En estos casos, el operador debe garantizar la seguridad mediante una **autorización operativa** otorgada por la autoridad competente², previa evaluación de riesgos según la

metodología SORA (Specific Operations Risk Assessment)³. Este análisis define los requisitos necesarios para operar de forma segura.

Sin embargo, algunos operadores pueden evitar la autorización operativa previa obteniendo un Certificado de Operador de UAS Ligeros (LUC), lo cual otorga, a operadores que han demostrado una elevada robustez, la posibilidad de validar sus estudios de seguridad dentro de un marco aprobado. Otra opción es realizar operaciones bajo los Escenarios Estándar (STS)⁴ definidos por la autoridad competente. En estos casos, no es necesario repetir la evaluación de riesgos, ya que las mitigaciones están predefinidas. El operador sólo necesita presentar una declaración operacional mostrando su capacidad para cumplir con los requisitos establecidos.

Finalmente, las operaciones en clubes y asociaciones de aeromodelismo autorizados también están incluidas en esta categoría, con algunas flexibilidades debido a su naturaleza asociativa. Según la naturaleza de la operación pretendida pueden requerir autorización.

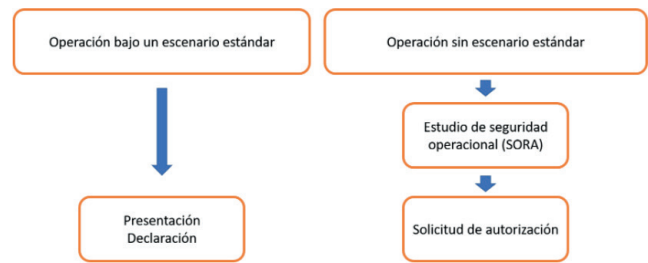


Ilustración 6. Operación en categoría específica. [Fuente: <https://www.droneuropa.com/escenarios-drones/>]

2.3. Categoría certificada

La categoría certificada se refiere a un conjunto específico de operaciones de UAS civiles que conllevan un **alto riesgo**, por lo que requieren tanto la **certificación** del sistema en sí, por parte de EASA, como la del operador.

1. MTOM (Maximum Take-Off Mass): masa máxima que el UAS puede tener, en total, cuando despegue.
 2. La Autoridad Competente es AESA en el caso de España.
 3. SORA es una metodología para la clasificación del riesgo que representa el vuelo de un dron en la categoría específica de operaciones y para la identificación de mitigaciones y objetivos de seguridad. Ayuda al operador a identificar las limitaciones operativas, los objetivos de capacitación del personal esencial para la operación (por ejemplo, pilotos remotos, observadores, mantenedores, etc.), los requisitos técnicos para el dron y a desarrollar los procedimientos operativos adecuados que formarán parte del manual del operador. EASA publicó el SORA como un Medio Aceptable de Cumplimiento del Artículo 11 del Reglamento (EU) 2019/947.
 4. Operaciones concretas para las que no es necesaria una autorización operacional individual, cumpliendo las condiciones y los requisitos definidos. En España, hay dos STS-ES; sin embargo, desde el 1 de enero de 2024, las nuevas declaraciones se deben presentar conforme a STS europeos. (Para más información, ver: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/operaciones-con-uas-drones/operaciones-con-uas-drones---categoria-especifica>).

Estas operaciones incluyen vuelos sobre concentraciones de personas, transporte de personas o mercancías peligrosas⁵, aeronaves de gran dimensión o cuando el riesgo no puede mitigarse adecuadamente sin certificación según la evaluación de riesgos.

Las operaciones en esta categoría están sujetas a estrictos requisitos operativos, incluyendo la emisión, modificación o revocación de certificados de operadores y licencias de pilotos, siendo esta la categoría con las exigencias más altas debido al riesgo asociado.

2.4. Requisitos para la operación a nivel nacional

Como se ha comentado en la introducción del presente apartado, cada una de las categorías y, en su caso, subcategorías de operación previamente definidas tiene asociadas una serie de requisitos en términos de: edad mínima, formación y registro del operador de UAS, y de seguro de responsabilidad civil y equipamiento de DRI que se resumen en la siguiente tabla.

Categoría	Abierta (A1)	Abierta (A2)	Abierta (A3)	Específica	Certificada
Edad (años)	- C0: 12 - C1: 14 MTOM<250g: 12 MTOM≥250g: 14	- C2: 14	- C2, C3, C4 o si MTOM<25kg: 14	16	TBD
Formación	- C1: Formación en línea (examen teórico básico)	Formación en línea (examen teórico básico), autoformación práctica (declaración) y Certificado de Competencia de Piloto a Distancia (examen teórico adicional)	Familiarización con las instrucciones facilitadas por el fabricante del UAS y formación en línea (examen teórico básico)	- STS-ES: Formación en línea A1/A3, examen teórico STS y, formación de aptitudes prácticas. - Operaciones con autorización operacional: Formación definida en la autorización operacional. - Para LUC: Formación según el resultado del estudio de seguridad que corresponda. - Club y asociaciones de aeromodelos: formación mínima definida en la autorización concedida al club.	Licencia correspondiente
Registro del operador	Cuando: MTOM≥250g; en caso de colisión, pueda transferir a un ser humano una energía cinética >80J; o equipado con un sensor capaz de capturar datos personales (excepción: sensor conforme a Directiva 2009/48/CE)			Sí	- Para LCI ⁶ y SAR ⁷ : Sí - Resto: No
Seguro	No	Sí	Si MTOM ≥ 20kg	Sí	Sí
DRI	- C1: Sí - Resto: No	Sí	- C3: Sí - Resto: No	Sí	TBD

Ilustración 7. Requisitos para la operación de UAS en España dependiendo de categorías y subcategorías [Fuente: elaboración propia]

3. LA INCORPORACIÓN DE LOS UAS CIVILES EN EL ESPACIO AÉREO

Entender cómo se estructura el espacio aéreo y determinados conceptos de las operaciones de la aviación civil es importante para comprender el impacto de las operaciones de los UAS civiles en la aviación convencional. Por ello, se ofrece a continuación un pequeño resumen de cómo se estructura tradicionalmente el espacio aéreo antes de pasar a explicar cómo le está afectando la incorporación de los UAS civiles.

3.1. Estructura del espacio aéreo

El espacio aéreo es el medio en el que se desarrolla la actividad de la aviación. A diferencia de lo que se pueda pensar al mirar hacia el cielo, el espacio aéreo no es un lugar vacío. En realidad, se encuentra minuciosamente estructurado y es escenario de una gran y variada actividad: transporte aéreo comercial, trabajos aéreos de distinta índole, operaciones militares, actividades de recreo y actividad espacial, etc. Estos usuarios del espacio aéreo reciben un nivel de servicio adaptado al tipo de operación que realicen y el lugar en el que estén operando, es por ello por lo que el espacio aéreo debe clasificarse de alguna forma. En unos casos se facilita información a los pilotos, en otros se emiten instrucciones de cómo deben proceder, e incluso se presta servicio de alerta y rescate para las aeronaves que lo necesitan.

5. Son aquellas que pueden llevar un elevado riesgo adicional a terceros, en caso de accidente.

6. LCI: Lucha Contra Incendios.

7. SAR: Búsqueda y Salvamento, por sus siglas en inglés.

Por su parte, las autoridades civiles y militares, tanto nacionales como internacionales, cuidan de que las operaciones de todos los usuarios del espacio aéreo sean seguras. A nivel internacional la “Organización de Aviación Civil Internacional” (OACI) es la entidad de referencia para la creación de normas y guías que sirven como marco base a las autoridades civiles nacionales y regionales.

En este contexto internacional, un primer nivel de división del espacio aéreo es en regiones; a nivel mundial hay 9 grandes regiones, cada una de ellas dividida también en subregiones de información de vuelo de nivel inferior (FIR) y superior (UIR). A España le corresponden la gestión de tres de ellas: FIR/UIR Madrid, FIR/UIR Barcelona y FIR/UIR Canarias.

Hay aún un nivel más de estructuración para dar servicio específico a cada fase de una operación aérea: aerovías (AWY), áreas de control terminal (TMA), áreas de control (CTA), zonas de control (CTR) y zonas de tránsito de aeródromo (ATZ), o zonas de información de vuelo (FIZ).

De esta manera, a cada parte del espacio aéreo estructurado se le asigna un código o nombre y le corresponderá una clasificación. Mediante la asignación de esa clase de espacio aéreo⁸ se determina qué tipos de vuelo pueden operar y se les ofrecen unos servicios acordes a sus características. En las clases que corresponden al espacio aéreo controlado, se presta servicio de control de tránsito aéreo. Se aplica para aerovías (AWY), áreas de control terminal (TMA), áreas de control (CTA), zonas de control (CTR) y zonas de tránsito de aeródromo (ATZ).

El espacio aéreo no controlado se utiliza para las zonas de información de vuelo (FIZ) o el resto de FIR/UIR que no forma parte de ninguna estructura específica.

En definitiva, todo el espacio aéreo tiene asignado un nivel de servicio que se otorga en base a criterios como el tipo de operaciones que acoge, la densidad del tráfico aéreo, y los requisitos de seguridad y control del tráfico aéreo necesarios.

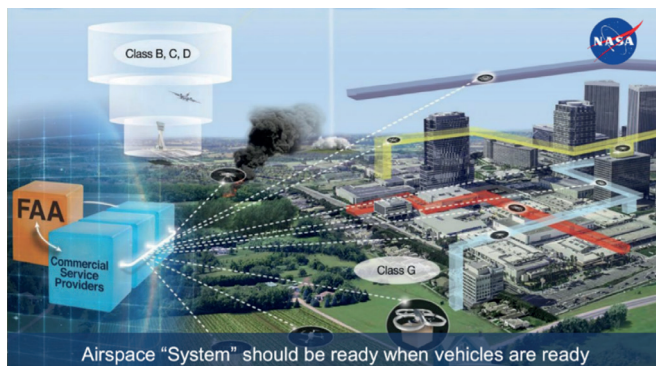


Ilustración 8. Estructura del Espacio Aéreo
[Fuente: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230012440/downloads/airspace-charts-august2023-ICAO-ANW-ThREV.pdf>]

En este complejo entorno han de integrarse las operaciones de los UAS garantizando la seguridad y velando por una convivencia armonizada en la que se tengan en cuenta los intereses de todos los actores involucrados. Como es de esperar, la integración de drones en distintas clases de espacio aéreo conlleva importantes implicaciones. En las clases de espacio aéreo más restrictivas, los drones deben obtener permiso del servicio de control de tránsito aéreo para operar y pueden estar sujetos a restricciones adicionales. Sin embargo, en espacio aéreo no controlado, los drones podrían operar con más libertad, pero aun así deben seguir ciertas reglas para garantizar la seguridad.

Una opción que se utiliza actualmente para operar drones es la **segregación** de una parte del espacio aéreo. Esto implica establecer una frontera virtual con la que se reserva cierta porción del espacio aéreo exclusivamente para la operación de determinados drones, evitando que pueda coincidir con otros tráficos aéreos. Aunque esta medida garantiza un alto nivel de seguridad, no siempre es la más conveniente si se busca fomentar el desarrollo de este tipo de operaciones, ni es conforme al concepto de Uso Flexible del Espacio Aéreo que se viene aplicando para aeronaves tripuladas con el fin de garantizar el acceso de todos los usuarios al espacio aéreo. Sin embargo, en fases de prueba, de desarrollo experimental o cuando las condiciones de la operación lo requieren, la segregación del espacio aéreo puede ser necesaria para asegurar un entorno controlado, en tanto no se disponga de U-Space como facilitador e integrador de estas operaciones.

3.2. El reto de la integración de los UAS civiles en el espacio aéreo

La integración de UAS en espacios aéreos, donde coexisten aeronaves tripuladas y no tripuladas, es un desafío creciente en la aviación moderna, impulsado por el avance tecnológico y el aumento en el uso de drones con fines recreativos y comerciales. Para garantizar una coexistencia segura, es esencial implementar tecnologías avanzadas de detección y seguimiento, especialmente para aeronaves no tripuladas a bordo, junto con sistemas de comunicación fiables y accesibles. Asimismo, resulta fundamental establecer estándares de seguridad rigurosos que protejan tanto a las aeronaves como a las personas en tierra. Este objetivo exige una combinación de innovación tecnológica, marcos regulatorios claros y una colaboración efectiva entre los actores de la aviación civil tradicional y la industria de drones. Solo con este enfoque integral se podrá lograr una integración segura y eficiente en el espacio aéreo compartido.

8. Toda la información relativa a la clasificación del espacio aéreo español se encuentra detallada, para su consulta, en la Publicación de Información Aeronáutica de España (AIP-España), en concreto en su parte ENR [REF 16].

Hoy en día, la mayor parte de los drones que se operan son de pequeño tamaño y se utilizan, principalmente, para tareas de vigilancia, fotografía u otros trabajos aéreos e ingenieriles. No obstante, están emergiendo otras aplicaciones como son el transporte logístico y la movilidad aérea urbana para traslado de personas u objetos, que buscan consolidarse en el entorno operacional. En respuesta a las necesidades que derivan de la interacción entre estos u otros drones y el resto de las aeronaves en el espacio aéreo surge el concepto de **Gestión del Tráfico de Sistemas de Aeronaves no Tripuladas (UTM)**, por sus siglas en inglés Unmanned Aircraft System Traffic Management) de la OACI.

OACI define la **UTM** como un aspecto específico de la gestión del tráfico aéreo que administra las operaciones de los UAS de manera segura, económica y eficiente, mediante la provisión de instalaciones y un conjunto integral de servicios en colaboración con todas las partes involucradas, y que incluye funciones tanto en el aire como en tierra [1]. El **UTMS** (Sistema UTM) se define como el sistema que proporciona UTM a través de la integración colaborativa de personas, información, tecnología, instalaciones y servicios, respaldado por comunicaciones, navegación y vigilancia basadas en aire, tierra o espacio.

Por su parte, la *Federal Aviation Administration* (FAA) de EEUU ha trabajado para establecer normativa, requisitos técnicos y la arquitectura de la UTM en EEUU. En 2023 publicó un plan de implementación en el que detalla requisitos y normas de seguridad necesarios para permitir y gestionar los servicios UTM, así como los roles de la industria y la FAA en el establecimiento y regulación de los servicios UTM [2]. En su fase actual de desarrollo, la UTM en EEUU es un sistema diseñado específicamente para la gestión del tráfico de drones a baja altitud, facilitando una interacción cooperativa entre los operadores de drones y el gestor del espacio aéreo en tiempo real, gracias a sistemas automatizados.

En Europa, el concepto para los sistemas UTM se ha desarrollado en los servicios y soluciones del **U-Space**. El U-Space ha sido concebido para permitir la operación segura y eficiente de drones en áreas urbanas y rurales a baja altitud, basándose en la automatización y digitalización. Es un ecosistema que está desplegando de forma armonizada en la Unión Europea y se constituye como un conjunto de proveedores, servicios y procedimientos que gestionará las operaciones UAS de forma regulada y coordinada en determinados espacios aéreos.



Ilustración 10. Representación gráfica de un posible escenario [Fuente: <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/geo-zones-know-where-fly-your-drone>]

La UTM desarrollado por la FAA y el U-Space comparten el objetivo principal de lograr la integración segura de los drones. Actualmente tienen ciertas diferencias puesto que son desarrollos regionales adaptados a la situación de cada zona. El grado de desarrollo de la UTM en EEUU es más avanzado, aunque en su primera fase opera únicamente en espacios aéreos segregados para drones.

Ahondando algo más en la situación en Europa, hay que decir que, como norma general, los UAS civiles pueden operar en cualquier parte del espacio aéreo bajo las mismas condiciones en que lo hacen las otras aeronaves. Por tanto, podrán volar siempre que se cumplan las condiciones operacionales estipuladas en el Reglamento 2019/947 [19] y que estén equipados y tengan capacidad de cumplir con las reglas del aire que rigen en el espacio aéreo en el que quieren operar. Pero hay entornos en los que los Estados pueden considerar que es necesario definir condiciones adicionales a la operación de los UAS civiles para poder velar por la

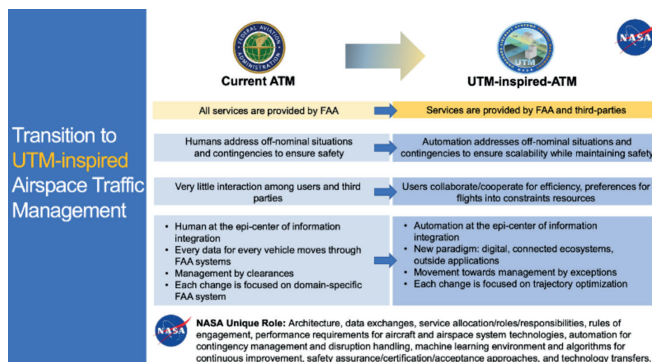


Ilustración 9. Visión de NASA de ATM inspirada en UTM [Fuente: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230012440/downloads/airspace-charts-august2023-ICAO-ANW-ThREV.pdf>]

seguridad, la protección, la privacidad o el medio ambiente; o espacios en los que puede eximirse a los UAS civiles de determinados requisitos de la reglamentación.

Para atender esta necesidad, la regulación europea [REF 19] ha definido un concepto que afecta a la estructuración del espacio aéreo. Así, para regular el vuelo de UAS en determinadas áreas manteniendo la seguridad y privacidad de las aeronaves, determinadas infraestructuras o zonas de interés medioambiental y de las personas en tierra, se crea la figura de **zonas geográficas de UAS** (también llamadas geozonas de UAS).

Zonas geográficas de UAS son la “parte del espacio aéreo establecida por la autoridad competente que facilita, restringe o excluye operaciones de UAS con el fin de gestionar los riesgos para la seguridad, la protección, la privacidad, la protección de datos personales o el medio ambiente”.

Así, se crea el concepto de un nuevo tipo de volumen de espacio aéreo con el que se podrán establecer porciones de espacio aéreo con condiciones especiales que aplican a los UAS. Corresponde a cada Estado definir las zonas geográficas de UAS por motivos de seguridad, protección, privacidad o medio ambiente en el espacio aéreo de su responsabilidad.



Ilustración 11. Ejemplo de zonas geográficas en espacio aéreo controlado [Fuente: “Guía sobre requisitos y limitaciones al vuelo de UAS en función del lugar de operación (Zonas Geográficas de UAS. Real Decreto 517/2024. (Edición 01, 25/06/2024)” de AESA].

Estas zonas geográficas de UAS se han clasificado en España en “generales” o “particulares”, de la siguiente manera:

Zonas geográficas de UAS generales. Zonas establecidas a través de la normativa nacional, en la que se definen las limitaciones y condiciones operacionales para cada una de ellas. Incluyen:

- Zonas prohibidas, restringidas y asociadas a la gestión del uso flexible del espacio aéreo.
- Zonas por razones de seguridad militar, de la Defensa Nacional y de la seguridad del Estado.
- Zonas por razón de la protección de las instalaciones e infraestructuras en las que se prestan servicios esenciales para la comunidad.
- Zonas por razón de la seguridad ciudadana y la protección de personas y bienes en entornos urbanos.
- Zonas por razón de la seguridad operacional en el entorno de los aeródromo o helipuertos, civiles o militares.
- Zonas por razón de la seguridad operacional en espacio aéreo controlado y en zonas de información de vuelo (FIZ).

Zonas geográficas de UAS particulares. Se trata de otras zonas aprobadas por la Comisión Interministerial entre Defensa y Transportes (CIDETRA) por razones de interés general y con carácter permanente. Aunque su activación puede ser temporal.

Todo ello se traduce en un conjunto de volúmenes representados sobre la geografía nacional que deben publicarse en un formato digital común único para consulta de cualquier interesado. La información en este formato está disponible en el estándar ED-318 en la sección de UAS de la AIP España (<https://aip.enaire.es/AIP/UAS-es.html>). Además, para facilitar la visualización e interpretación de las zonas geográficas en España, ENAIRE ha desarrollado la aplicación “ENAIRE Drones” (<https://drones.enaire.es/>).

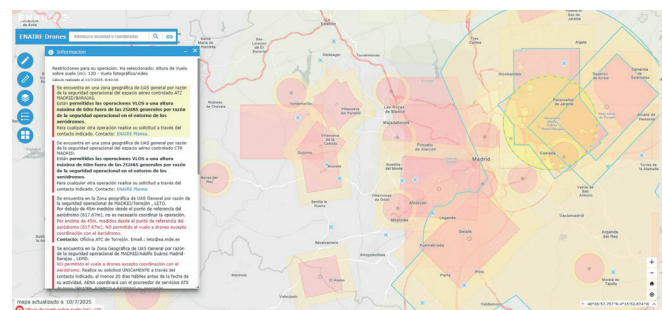


Ilustración 12. Representación de Zonas Geográficas de UAS de la aplicación ENAIRE Drones [Fuente: <https://drones.enaire.es/>].

En cada zona geográfica de UAS se establecen las condiciones particulares de uso de espacio aéreo y los requisitos de equipos necesarios. A fecha de elaboración de este cuaderno aún se está en proceso de definición de los espacios aéreos U-Space y servicios U-Space. Pero una vez estén definidos será necesario que a nivel nacional se publiquen también zonas geográficas de UAS específicas en las que se establezcan los espacios aéreos U-Space y los servicios de U-Space que correspondan, según se verá más adelante.

3.3. Evolución futura de las estructuras de espacio aéreo

La creciente demanda de operaciones con UAS civiles está impulsando una transformación en la organización y gestión del espacio aéreo. Para acomodar de manera eficiente y segura estas nuevas operaciones, se están desarrollando diversas propuestas que optimizan los flujos de tráfico, especialmente en entornos urbanos y áreas con alta densidad de vuelos.

En Europa, el programa SESAR lidera varios proyectos innovadores que buscan soluciones avanzadas y eficientes para la integración segura de las operaciones. Proyectos como TindAIR, BUBBLES, CORUS-XUAM, Metropolis, USEPE o U-Space4UAM han abordado la definición de servicios U-Space y su evolución, cada uno con enfoques independientes y alcanzando distintos grados de desarrollo y madurez en sus propuestas.

Entre estos, el proyecto CORUS-XUAM [REF 3] ha ganado un fuerte respaldo en Europa. Este proyecto, desarrollado por un consorcio paneuropeo liderado por **EUROCONTROL** y con la participación de importantes actores como **Airbus** y **ENAIRE**, ha presentado varias actualizaciones sobre su concepto de operaciones dentro del marco de U-Space.

El proyecto CORUS – XUAM ha propuesto una nueva estructura que afecta al espacio aéreo a baja altitud⁹. Esta iniciativa propone la división del espacio aéreo a bajas cotas en tres tipos de volúmenes diferenciados, adaptados al nivel de tráfico y riesgo:

- **Volumen X:** diseñado para entornos con poco tráfico y bajo riesgo. Donde los pilotos pueden volar sin

necesidad de presentar un plan de vuelo, asumiendo la responsabilidad de evitar colisiones.

- **Volúmenes Y:** Se trata de zonas con mayor actividad y riesgo. En este caso, se requiere la presentación de plan de vuelo y se realiza una planificación previa de las rutas y horarios, garantizando que los UAS mantengan una distancia segura de separación entre sí durante el vuelo.
- **Volúmenes Z:** se reservan para las áreas más complejas, con altas densidades de tráfico. En estos espacios es necesario prestar separación antes y durante el vuelo. En función de quién preste esa separación se prevén tres variantes de volúmenes Z: Za, Zu y Zz. En los Za son los servicios de Control de Tránsito Aéreo (ATC) los encargados de proveer separación; en los volúmenes Zu, esta tarea recae sobre los servicios de U-Space; y en los Zz, los proveedores de U-Space prestarán únicamente servicio de asesoramiento.

La siguiente ilustración ofrece un ejemplo de este tipo de estructuración del espacio aéreo.



Ilustración 13. Ejemplo de volúmenes de espacio aéreo [Fuente: Microsoft PowerPoint CORUS-Overview-TIM.pptx (eurocontrol.int)].

Por su parte, en los EEUU la propuesta de la NASA [REF 4] pasa por dividir el espacio aéreo urbano en varias capas con diferentes estructuras. Para este caso se definen tres conceptos clave: “Sky Lanes”, carriles equivalentes a las carreteras convencionales; “Sky Tubes”, túneles aéreos dentro de los cuales los UAS pueden moverse libremente, pero siguiendo una dirección concreta; y “Sky Corridors”, pasillos donde los vehículos pueden moverse libremente en

9. Nótese que se habla de “altitud” y no de “altura”. En aviación, la altitud es la distancia vertical entre una aeronave y el nivel medio del mar, mientras que la altura es la distancia vertical entre la aeronave y un punto específico del terreno o superficie debajo de ella. La altitud se utiliza como referencia estándar para la navegación aérea y la separación entre aeronaves, mientras que la altura es más relevante en maniobras cerca del suelo, como despegues y aterrizajes.

cualquier dirección. Tanto los Sky Lanes como Sky Tubes estarán dotados de una estructura interna que facilitará la separación vertical entre las operaciones, garantizando una mayor seguridad. En cambio, en los Sky Corridors, serán los UAS los que se encarguen de mantener la separación entre ellos haciendo uso de sus sistemas de detección y evasión para evitar colisiones.

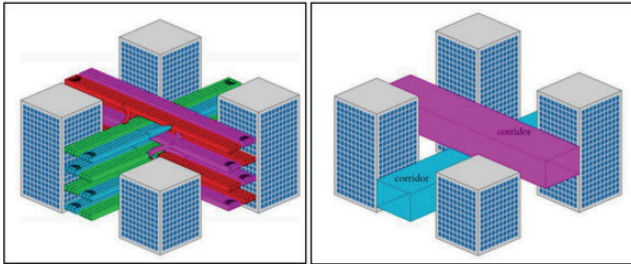


Ilustración 14. Ejemplo estructuración espacio aéreo NASA
[Fuente: "Concepts of Airspace Structures and System Analysis for UAS Traffic flows for Urban Areas"].

Además, en julio de 2023 la NASA lanzó el informe (White Paper) sobre el concepto **SKY for ALL** [REF 9]. Esta iniciativa, que se espera tener implementada en 2050, imagina un espacio aéreo futuro donde una amplia gama de vehículos aéreos, tripulados y no tripulados, puedan operar de manera fluida y segura. El concepto promueve un sistema de gestión del tráfico aéreo altamente automatizado, eficiente y escalable, capaz de manejar la creciente diversidad de tipos de aeronaves y operaciones de forma sostenible, incluyendo la Movilidad Aérea Urbana (UAM) y drones. Su objetivo es integrar los nuevos tipos de vehículos aéreos, promoviendo operaciones seguras, eficientes y flexibles para todos los usuarios. Utiliza una arquitectura abierta y colaborativa, respaldada por sistemas inteligentes y análisis predictivo para mejorar la seguridad, escalabilidad y resiliencia del sistema. Pero su objetivo final es aún más amplio: contribuir al desarrollo económico y alcanzar las metas de **cero emisiones netas** para 2050.

En paralelo a estas iniciativas, empresas líderes en la industria aeronáutica como Airbus, Boeing y Embraer, junto con países como China y Singapur, están desarrollando sus propias propuestas para gestionar el tráfico aéreo de drones. Algunas de las tendencias promovidas exploran la creación de sistemas en los que la responsabilidad de la explotación no recaiga en una única autoridad central. Aunque esta idea podría parecer a priori más ágil, su implementación sería más compleja y plantea retos significativos para garantizar la confianza y seguridad en las operaciones aéreas, al requerir una coordinación precisa entre diversos actores y tecnologías [6].

En resumen, el diseño de una nueva estructura del espacio aéreo que integre de forma eficiente las operaciones de drones plantea un desafío significativo para los distintos

actores involucrados. El reto principal consiste en encontrar un equilibrio entre dos enfoques opuestos: por un lado, un espacio aéreo menos estructurado, que permite asumir mayor densidad de tráfico y flexibilidad, puesto que se reducen las restricciones y se permite a las aeronaves seguir las rutas preferidas por los propios usuarios, pero podría afectar a la seguridad de las operaciones; por otro, un espacio aéreo excesivamente estructurado, que aunque mejora la organización, podría limitar el rendimiento y la eficacia del sistema.

Lograr este balance es fundamental para alcanzar el equilibrio entre seguridad, capacidad y eficiencia. Por tanto, es crucial continuar investigando y consensuando la solución que permita una integración eficiente y segura de las aeronaves no tripuladas, especialmente en entornos urbanos y otros escenarios de alta densidad de tráfico.

4. SERVICIOS A OPERADORES UAS CIVILES

4.1. Situación actual

Las aeronaves utilizan determinados servicios tanto para la planificación como durante la ejecución de sus vuelos. Estos servicios están estandarizados globalmente bajo el paraguas de OACI y, a nivel local, cada autoridad competente se encarga de regularlos y garantizar que se prestan tal como está establecido. En Europa, es la Comisión Europea quien, a través de la European Union Aviation Safety Agency (EASA), regula todos esos servicios a los que pueden acceder las aeronaves. Son los Servicios que se conocen como ATM/ANS (Air Traffic Management/ Air Navigation Services).

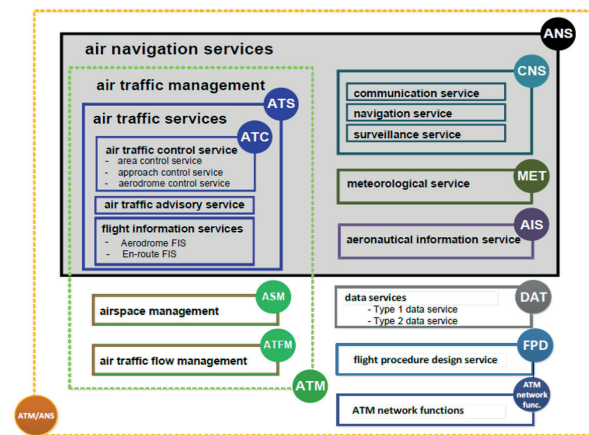


Ilustración 15. Esquema de Servicios de Navegación Aérea de EASA. [Fuente: Easy Access Rules for ATM-ANS (Regulation (EU) 2017/373), Published February 2023]

A lo largo del tiempo, los servicios ATM/ANS han tenido que evolucionar y adaptarse a los progresos de la aviación, tanto por el número de vuelos como por la diversidad de operaciones aéreas. Siempre con el objetivo principal de garantizar la seguridad, la eficiencia y la regularidad del tránsito aéreo en el espacio aéreo bajo su responsabilidad.

Una parte esencial de estos servicios son los servicios de Comunicación, Navegación y Vigilancia (CNS, por sus siglas en inglés Communication, Navigation and Surveillance). Estos sistemas engloban una gran cantidad de equipos, procedimientos y profesionales que cumplen funciones clave para la aviación:

- **Comunicación:** Facilita el intercambio de información, en voz o datos, entre aeronaves, entre las aeronaves y los servicios de tierra, o entre los distintos servicios aeronáuticos en tierra;
- **Navegación:** Dispone de sistemas y métodos que ayudan a las aeronaves equipadas a conocer su posición y estimar la ruta que deben seguir;
- **Vigilancia:** Permite el seguimiento y supervisión del movimiento de las aeronaves desde las posiciones equipadas en tierra.

Otro grupo de servicios que ha experimentado una evolución importante es el de Gestión del Tránsito Aéreo (ATM). Este servicio tiene como finalidad garantizar un flujo seguro, dinámico, económico y eficiente de las aeronaves. Como parte de estos servicios se incluyen:

- **Gestión del Espacio Aéreo:** Organiza, asigna y coordina el uso del espacio aéreo para que las operaciones sean seguras.
- **Gestión de Afluencia de Tránsito Aéreo:** Regula y ordena el número de operaciones evitando saturaciones, optimizando rutas y minimizando demoras.
- **Servicios de Tránsito Aéreo:** Ofrece control, información, asesoramiento y alerta a las aeronaves, según la necesidad específica de cada operación.

En este escenario se ha de incorporar la gran diversidad de tipos y misiones que abarcan los UAS a la que habrá que proveer servicios.

Típicamente, los **UAS pequeños** tienen un alcance limitado, que suele ser la línea de vista. Su capacidad de carga de pago y autonomía de la batería no son elevadas, por lo que atienden misiones de corta duración o vuelos estáticos. Son muy utilizados en aplicaciones comerciales ligeras, como fotografía, vigilancia cercana o recreación.

A medida que aumenta el tamaño y el peso del UAS, también lo hacen su alcance, autonomía y capacidad de transportar cargas más pesadas. Estas características los hacen adecuados para operar en entornos más exigentes y misiones más complejas y prolongadas, como inspecciones industriales, logística y monitoreo de áreas extensas.

En este grupo se encuentran los aerotaxis. Estos UAS civiles se diseñan específicamente para el transporte de pasajeros, principalmente en entornos urbanos. Se encuentran actualmente en constante desarrollo y juegan un papel fundamental en lo que se llama la **Movilidad Aérea Urbana (UAM)**. Para su operación es crítico contar con sistemas altamente seguros, confiables y eficientes para realizar vuelos cortos y frecuentes de manera sostenible.

También deberán atenderse operaciones de **UAS civiles a gran altitud**. Estas operaciones las realizan drones de tamaño variable, pero tienen en común que operan en la estratosfera y pueden permanecer en vuelo durante largos períodos sin necesidad de aterrizar o recargar. Por tanto, requieren sistemas de comunicación robustos para mantener una conexión estable con los operadores en tierra. Son ideales para misiones de observación a gran altitud o incluso como plataformas de telecomunicaciones.

Con todo ello, es evidente que la integración de las operaciones de UAS en el espacio aéreo supone un desafío. No sólo se hace necesaria la evolución de los servicios ATM/ANS que atienden a la aviación tradicional, sino que se está asistiendo al desarrollo de nuevos servicios que complementan a los ya existentes.

Los conceptos **U-Space y UTM**, se ocuparán de la gestión del tráfico aéreo no tripulado en el espacio aéreo. Si bien se puede establecer un paralelismo con el servicio tradicional de gestión del tránsito aéreo (ATM), el volumen de tráfico de UAS civiles esperado en el futuro y la diversidad de agentes que estarán involucrados (proveedores de servicios, empresas operadoras, pilotos, usuarios o clientes y tráfico aéreo tradicional) exige una nueva forma de gestionar el espacio aéreo.

Por otro lado, se introduce el concepto Space Traffic Management (**STM**), que aborda la gestión del espacio exterior y el espacio aéreo superior. La Comisión Europea define STM como los medios y las normas para acceder al espacio exterior, realizar actividades en él y regresar de forma segura, sostenible y protegida [7]. En el contexto de este cuaderno, este concepto es aplicable tan solo a las aeronaves tipo HAPS, que se describen en mayor detalle en el Capítulo 6.

Estos nuevos conceptos imponen un entorno colaborativo con un alto grado de automatización, donde la supervisión y gestión del tráfico aéreo no dependa del factor humano. Este enfoque automatizado será clave para garantizar la seguridad y eficiencia en un contexto en el que se prevé gran número de UAS civiles operando simultáneamente.

4.2. Servicios U-Space

Como se adelantó en el apartado 1.3, para acometer la gestión del tránsito aéreo de UAS en el espacio aéreo en Europa se trabaja sobre el concepto de U-Space. Este ecosistema europeo, constituye un conjunto de servicios y procedimientos que gestionará las operaciones UAS de forma regulada y coordinada en determinados espacios aéreos.

En 2021 la Comisión Europea publicó el paquete reglamentario del U-Space. Estas regulaciones establecen las bases para la operación segura y eficiente de drones civiles en el espacio aéreo europeo, promoviendo su integración en el entorno aéreo convencional.

El Reglamento U-Space se aplicará, dentro de las zonas geográficas de los UAS definidas como espacio aéreo U-Space por los Estados miembros, a los operadores de UAS, los proveedores de servicios de U-Space y los proveedores de servicios de información común.

También, teniendo en cuenta que el marco de aplicabilidad del Reglamento U-Space se limita al ámbito EASA, significa que no debe aplicarse a las operaciones de aeronaves que lleven a cabo actividades o servicios militares, de aduanas, policía, búsqueda y salvamento, lucha contra incendios, control fronterizo, vigilancia costera o similares emprendidas en el interés general (**actividades no EASA**) a menos que el Estado miembro haya decidido aplicar normas sobre aeronaves no tripuladas a algunas o todas esas actividades.

En este contexto, se definen conceptos básicos como qué debe entenderse por “**espacio aéreo U-Space**”¹⁰ y por “**servicio de U-Space**”¹¹. También que los Estados miembros deben realizar una evaluación de riesgos en cada espacio aéreo U-Space para definir cómo serán las operaciones de UAS en cada uno de estos espacios aéreos. Como resultado de dichas evaluaciones se determinan las capacidades y requisitos de rendimiento de los UAS que podrán operar, los requisitos de rendimiento de los servicios de U-Space que deberán prestarse y las condiciones operativas y limitaciones necesarias.

Hay determinados servicios mínimos obligatorios que deben proporcionarse en los espacios aéreos U-Space para todas las operaciones UAS. Estos son:

- a) **el servicio de identificación de red:** permite el procesamiento continuo de la identificación remota del UAS a lo largo de la trayectoria del vuelo y proporciona esta información a usuarios autorizados, como pueden ser otros proveedores dentro del mismo espacio aéreo U-Space, los proveedores ATS (Air Traffic Service) afectados, las autoridades competentes o el público general, según regulen las leyes nacionales;
- b) **el servicio de geoconsciencia:** proporciona a los operadores información sobre las condiciones operacionales, limitaciones de espacio aéreo, las zonas geográficas de UAS pertinentes para el espacio aéreo U-Space, así como posibles restricciones temporales de uso aplicables;
- c) **el servicio de autorización de vuelo de UAS:** el proveedor autoriza individualmente cada solicitud de vuelo de UAS fijando los términos y condiciones de dicho vuelo. El proveedor debe identificar y resolver las incompatibilidades con otras solicitudes de autorización de vuelos, con las restricciones y limitaciones dinámicas del espacio aéreo, con las condiciones meteorológicas y con la información de tráfico de aeronaves tripuladas en la zona;
- d) **el servicio de información sobre el tráfico:** el proveedor informa a los operadores UAS sobre cualquier otro tráfico aéreo perceptible que pueda estar cerca de la posición o la ruta de vuelo prevista del UAS, tanto de aeronaves tripuladas como de otros UAS.

Estos servicios están necesariamente complementados por la información mínima que deben facilitar los Estados como parte de los “**servicios comunes de información**” en cada espacio aéreo U-Space:

- dimensiones (límites horizontales y verticales) del espacio aéreo U-Space;
- requisitos determinados en base a la evaluación de riesgo en ese espacio aéreo;
- lista de proveedores certificados que ofrezcan servicios de U-Space en el espacio aéreo U-Space,

10. “Espacio aéreo U-Space”: zona geográfica de UAS designada por los Estados miembros, en la que solo se permite que se lleven a cabo operaciones de UAS con el apoyo de servicios de U-Space. [REF 20]

11. “Servicio de U-Space”: servicio basado en servicios digitales y automatización de funciones diseñados para facilitar un acceso protegido, eficiente y seguro al espacio aéreo U-Space para un gran número de UAS. [REF 20]

en la que se incluya, para cada uno de ellos: identificación y datos de contacto, servicios de U-Space proporcionados y, en su caso, limitación/es de la certificación;

- espacio o espacios aéreos U-Space adyacente/s;
- zonas geográficas de UAS pertinentes para el espacio aéreo U-Space; y
- restricciones estáticas y dinámicas del espacio aéreo definidas y que limitan, ya sea de forma permanente o temporal, el volumen de espacio aéreo dentro del espacio aéreo U-Space donde pueden tener lugar las operaciones de UAS.

Además, a la hora de establecer un espacio aéreo U-Space, tras la evaluación del riesgo en el espacio aéreo, el Estado puede exigir la prestación de dos servicios adicionales: los de información meteorológica y supervisión de la conformidad.

- **Servicio de información meteorológica:** el proveedor recopila datos meteorológicos de una fuente de confianza y proporcionar previsiones e información meteorológica a los operadores UAS.
- **Servicio de supervisión de la conformidad:** permite a los operadores verificar que cumplen los requisitos de rendimiento de UAS aplicables, las condiciones y limitaciones del espacio aéreo en el que operan y que se cumplen los términos de la autorización de vuelo del UAS. En caso de incumplirse alguno, se alerta al operador UAS, así como a las dependencias ATS pertinentes y otros proveedores de servicios de U-Space cuando les afecte.

En cuanto a los proveedores de estos servicios, deben estar certificados para poder prestar servicio y se distinguen dos tipos:

- **Proveedores de Servicios de Información Común (CISP,** por sus siglas en inglés), encargados de los servicios de Información Común, y
- **Proveedores de Servicios del U-Space (USSP,** por sus siglas en inglés), encargados del resto de los servicios U-Space de los que se ha hablado anteriormente.

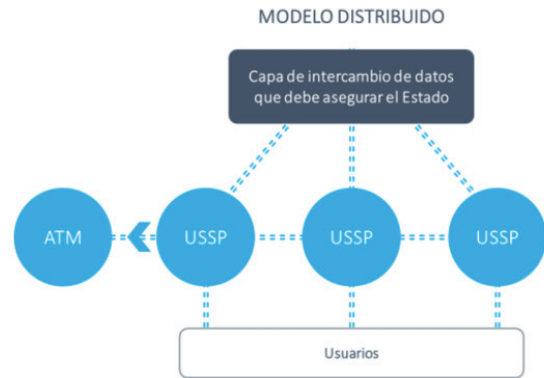
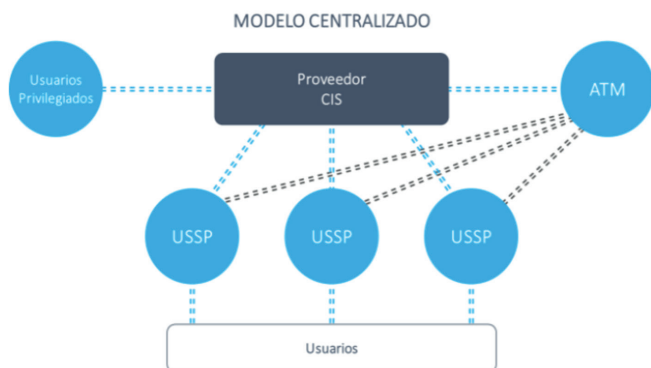


Ilustración 16. Comparación esquemática de los modelos distribuido y centralizado de prestación de servicios U-Space [Fuente: PANDU].

Por su parte, cada Estado puede decidir gestionar la provisión de servicio en sí misma según dos modelos: modelo centralizado o modelo distribuido. En el **modelo centralizado**, el Estado designa un único proveedor CIS en los espacios U-Space que son de su responsabilidad; este proveedor CIS es el único punto focal de Información Común en su U-Space y puede actuar de enlace entre los USSP y proveedores ATS. En cambio, en el **modelo distribuido** no hay proveedor CIS y es el Estado el responsable de poner a disposición la Información Común. Las coordinaciones entre los USSPs y los proveedores ATS se realizan de manera directa, sin intermediarios.

En línea con el marco reglamentario europeo, en España el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana publicó en 2022 la primera edición del Plan de Acción Nacional para el Despliegue del U-Space 2022-2025 [REF 15], conocido como PANDU. Este Plan, actualizado con su segunda versión en octubre de 2024, tiene como objetivo principal involucrar a todos los agentes del sector mediante la definición de estrategias clave que facilitarán la implementación del sistema U-Space durante el periodo 2022-2025. Para preparar el marco nacional para la adopción del U-Space, PANDU presenta una hoja de ruta dinámica para 2022-2025 en base a la cual se determinarán líneas de actuación y acciones específicas en los cuatro ejes principales que es necesario acometer para la implantación exitosa del U-Space:

1. Actuaciones en materia de espacio aéreo.
2. Implantación del modelo de prestación de servicios nacional.
3. Despliegue de los servicios de U-Space y CIS y habilitadores para su prestación.

4. Establecimiento de los mecanismos de cooperación y colaboración entre administraciones.

Respecto al modelo de prestación de servicios, PANDU establece la decisión de implementar en España un sistema centralizado, donde ENAIRE¹² es el proveedor único CISP. Esto queda plasmado con la publicación del Real Decreto 517/2024 [REF 13], donde se designa a ENAIRE como proveedor único de servicios de información común para prestar sus servicios de forma exclusiva en todos los espacios aéreos U-Space designados en espacio aéreo de responsabilidad española, al menos durante los 10 primeros años de prestación del servicio.

Para garantizar la eficacia de este modelo, PANDU detalla una serie de acciones específicas para lograr la certificación y el despliegue de estos servicios en el espacio aéreo nacional.

Y en relación con los servicios U-Space, cabe destacar que estarán limitados a ciertas zonas geográficas de UAS designadas a tal efecto. Estos servicios permitirán facilitar la convivencia de los UAS en entornos complicados (sobre todo urbanos) y su correcta compatibilidad con los espacios aéreos circundantes y el tráfico tripulado. Pero no serán necesariamente utilizados por muchas de las operaciones de drones que se llevan a cabo hoy en día, como pueden ser operaciones de campo (inspecciones de infraestructura, labores agrarias o topográficas), operaciones de HAPS u operaciones puntuales (como pueden ser eventos o demostraciones) siempre que tengan lugar fuera de las zonas geográficas de UAS definidas con servicios U-Space.

A fecha de elaboración de este cuaderno, aunque se haya designado a ENAIRE como CISP en España, aún no se ha completado su proceso de certificación. Hasta que este proveedor no esté operativo, no entrarán en funcionamiento otras entidades que puedan certificarse como USSP.

4.3. Otros servicios

En la actualidad, al margen de la provisión de servicios que prestarán los CISP y USSP, los proveedores de servicios de tránsito aéreo que soportan las operaciones de las aeronaves convencionales ofrecen una serie de servicios para poder compatibilizar de forma segura las operaciones de drones con el tránsito aéreo general. Por ejemplo, además de la ya mencionada aplicación “ENAIRE Drones”, para la consulta de las zonas geográficas de UAS y las condiciones bajo las que se permiten o limitan las operaciones en un área y los avisos de interés para su operación, también se ofrece

“ENAIRE Planea”, una plataforma diseñada por ENAIRE para la gestión de operaciones no convencionales de drones, aeronaves tripuladas y otros usos del espacio aéreo; hoy en día es el medio para coordinar las operaciones de UAS que requieran aprobación en las zonas geográficas de ENAIRE.

5. REGLAS DE VUELO (VFR/IFR/DFR)

El concepto de reglas de vuelo es básico en la aviación civil convencional. Constituyen las normas básicas que establecen las condiciones mínimas y suficientes que deben regir para que un piloto pueda dirigir de manera segura su aeronave, así como para navegar e interactuar con el resto del tráfico aéreo de manera apropiada. Estas normas pueden traducirse en reglas para el manejo de la aeronave, procedimientos establecidos en función de la fase de vuelo, requisitos de equipamiento y requisitos de formación, entre otros.

5.1. Reglas de vuelo tradicionales

En la aviación civil se definen actualmente dos tipos de reglas de vuelo: las **reglas de vuelo visual (VFR)**, por sus siglas en inglés) y las **reglas de vuelo instrumental (IFR)**. Ambas las especifica OACI a nivel internacional¹³, y a nivel UE la Comisión Europea las traspone en sus Reglas del Aire (SERA) [17].

Cuando un vuelo elige seguir las **reglas VFR** implica que la aeronave operará con unas condiciones de visibilidad y distancia a las nubes mínimas para que la visión de su entorno sea tal que le permita mantener la separación apropiada con otras aeronaves y el terreno.

En caso de que las condiciones meteorológicas no permitan que se cumplan los mínimos que requiere el vuelo visual, las operaciones de aviación civil únicamente pueden realizarse siguiendo las **reglas IFR**. Estas reglas de vuelo, a cambio de permitir volar con menor visibilidad, imponen requisitos más estrictos en cuanto a certificación y cualificación del piloto y de la aeronave. Por ejemplo, las aeronaves deben estar equipadas con instrumentos con los que el piloto sea capaz de navegar y dirigir el vuelo a su destino sin contacto visual con el exterior, incluso entre nubes. También deben cumplir ciertos requisitos de comunicaciones.

Ya se han tratado en otros apartados las diferencias de diseño entre los UAS civiles de uso más habitual y las aeronaves

12. ENAIRE es el principal proveedor de servicios de navegación aérea y de información aeronáutica en España. (https://www.enaire.es/sobre_enaire/conoce_enaire/quienes_somos)

13. En su Anexo 2 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Reglamento del Aire.

tripuladas tradicionales. También se sabe que su tamaño es típicamente muy inferior al de las aeronaves convencionales y con patrones de trayectoria muy distintos. Incorporar UAS civiles junto a operaciones de aeronaves convencionales bajo cualquiera de las reglas de vuelo definidas supone un desafío significativo. Por un lado, los requisitos técnicos de aviónica, certificación y comunicaciones hacen muy difícil que los UAS civiles puedan realizar operaciones IFR. Por otro lado, el riesgo de no ser detectados con la suficiente antelación como para separarse de forma apropiada hace que incorporar UAS civiles en entornos de vuelos VFR represente un riesgo. En definitiva, cualquiera de las dos opciones incrementaría el peligro en espacio aéreo compartido.

En resumen, las reglas de vuelo definidas para la aviación convencional, tal como lo están actualmente, se consideran insuficientes para poder integrar de forma segura las operaciones con UAS civiles. Por esta razón se tiende actualmente a segregar el espacio aéreo. Sin embargo, y dado que esta forma de proceder no es compatible con la aplicación del uso flexible del espacio aéreo (FUA), se está en proceso de definir normas de operación compatibles con el vuelo de UAS civiles

5.2. Las propuestas para el futuro: Reglas de vuelo digitales (DFR)

Las reglas tradicionales de vuelo (VFR e IFR) no pueden soportar la creciente complejidad y demanda operativa sin crear cuellos de botella en la gestión del tráfico aéreo. Por ello, hay un gran interés internacional, a todos los niveles implicados, en aportar una solución. A este respecto, la NASA está impulsando el concepto de un nuevo conjunto de reglas de vuelo como vehículo fundamental de su iniciativa Sky for All: **las reglas de vuelo digitales (DFR)**. Las DFR, según están ideadas, introducirán la automatización en el sistema de gestión del tráfico aéreo mediante la integración de los conceptos de gestión del tráfico de UAS (UTM) y de la gestión del tráfico aéreo (ATM). Proponen una forma de operar para todos los usuarios del espacio aéreo, que complementa y se suma a los modos operativos existentes de VFR e IFR, basándose en la integración cooperativa en todo el espacio aéreo.

Los principales beneficios operacionales de las DFR para los nuevos usuarios y los operadores actualmente establecidos se deberán a que podrán combinar el acceso al espacio aéreo del que disponen las IFR con la flexibilidad operativa que ofrecen las VFR. Los principios bajo los cuales se están definiendo las DFR incluyen que deben ser totalmente

interoperables con operaciones VFR e IFR sin necesidad de imponer nuevos requisitos sobre esas reglas. Con ello, aumentarán la accesibilidad y la flexibilidad operativa en todas las condiciones de visibilidad sin necesidad de segregación de las operaciones existentes.

En el contexto de las DFR, la navegación y separación de las aeronaves se realizaría mediante información digital y automatización, en lugar de depender de la visión del exterior (como en las VFR) o de la intervención directa de los controladores aéreos (como ocurre en las IFR en entornos de espacio aéreo controlado). La seguridad del vuelo se garantizaría mediante tecnologías de conectividad, intercambio de información en tiempo real y automatización avanzada. Esto permitiría a las aeronaves autogestionar su ruta y evitar colisiones de forma cooperativa y sin necesidad de control externo.

En resumen, se espera que el concepto operacional que se está proponiendo para las DFR permita lograr los objetivos:

- **Aumentar la capacidad del espacio aéreo:** Permite a los operadores volar en cualquier clase de espacio aéreo que se traduce en: mayor flexibilidad en las operaciones en espacio aéreo controlado y mayor densidad de operaciones en espacio aéreo no controlado.
- **Mayor seguridad y eficiencia del uso de espacio aéreo:** Se proporciona información digital, servicios de tráfico compartidos y prácticas cooperativas, lo que deriva en una mayor conciencia situacional, una gestión más eficiente de los conflictos de tráfico y una reducción de la carga de trabajo de los controladores de tránsito aéreo. Todo ello redundará en una mayor seguridad y eficiencia.
- **Flexibilidad operativa:** Se permite a los operadores cambiar dinámicamente la ruta de vuelo sin necesidad de referencia visual externa o autorización específica de control de tráfico aéreo, brindando así mayor autonomía y capacidad de adaptación a las condiciones externas.
- **Crecimiento regional:** Las reglas de vuelo digitales pueden facilitar el crecimiento de la aviación en regiones específicas al permitir operaciones independientes de la infraestructura de aeropuertos y la capacidad de operar en aeropuertos sin control de tráfico aéreo.

Estas nuevas reglas de vuelo DFR son una propuesta impulsada por la NASA que está siendo bien acogida por parte del entorno internacional. Pero la incorporación de

estas DFR al panorama aeronáutico internacional no sería inmediata, requiere cambios regulatorios importantes para codificarlas como un nuevo modo de operación formal.

Por otra parte, existen **otras propuestas que defienden que no es necesario definir nuevas reglas de vuelo**, sino que han de adaptarse las actuales y debe aumentarse la automatización y el intercambio de datos que haga la planificación y seguimiento de los vuelos más rápida y versátil. Por ejemplo, en el marco de SESAR (Single European Sky ATM Research) se han hecho ejercicios para el rediseño de la arquitectura del espacio aéreo alrededor del aeropuerto de Milán. Allí el espacio aéreo es de Clase A, lo que implica la prestación del máximo nivel de servicios de tránsito aéreo, y se habían diseñado nuevas rutas IFR de bajo nivel para operaciones de helicópteros respaldadas por sistemas apropiados CNS/ATM para proporcionar accesos al aeropuerto suficientemente alejados de actividades de ala fija. Además, como parte de las investigaciones del concepto de operaciones SESAR para sistemas UTM europeos (CORUS), se han realizado algunos trabajos preliminares para examinar cómo podría funcionar un sistema IFR digital de baja altitud. Según estos conceptos, habría que incorporar modificaciones en el sistema de Control de Tránsito Aéreo y sus procedimientos; la separación sería proporcionada normalmente de forma automática y el controlador intervendría sólo ante situaciones excepcionales. Los sistemas CNS/ATM también deberán invertir en una mayor digitalización y automatización.

Como se puede ver, todas las propuestas trabajan en torno a potenciar la automatización y digitalización de los servicios. Y en todas ellas se persigue el objetivo de permitir operaciones más seguras y eficientes, sin aumentar la carga de trabajo de los controladores aéreos y facilitando la integración de nuevos tipos de vehículos aéreos en el espacio compartido.

6. NUEVO ESCENARIO URBANO PARA UAS: VERTIPUERTOS

Es evidente que acomodar la operación de los UAS en entornos poblados requiere de esfuerzos adicionales. El análisis de este tipo de operaciones se encuadra en el concepto de **“Movilidad Aérea Urbana” (UAM)** que se desarrolla en el Capítulo 5. Ésta es una realidad que se está abriendo paso cada vez con mayor fuerza y va a obligar a adaptar ciertos entornos para poder garantizar la seguridad y viabilidad de las operaciones. Para el despegue y aterrizaje de las aeronaves se ha ideado el concepto de **Vertipuertos**

que se explica en este apartado por ser un escenario creado específicamente para los UAS.

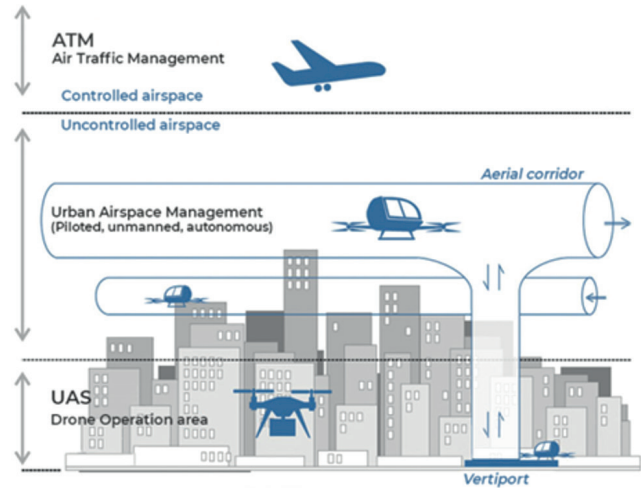


Ilustración 17. Llegada/salida desde vertipuertos según el proyecto de investigación EUREKA de SESAR [Fuente: <https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/sesar-eureka-research-project-to-address-arrival-departure-to-from-vertiports/>].

6.1. Definición y propósito de los vertipuertos – diferencia respecto a helipuertos

Los vertipuertos son instalaciones diseñadas específicamente para el despegue y aterrizaje de vehículos aéreos de despegue y aterrizaje vertical (VTOL, por sus siglas en inglés: Vertical Take-Off and Landing), constituyendo un elemento fundamental en la planificación de operaciones de UAS. Estas infraestructuras juegan un papel esencial en la UAM, facilitando el transporte eficiente de pasajeros en áreas urbanas densamente pobladas, aliviando la congestión de los sistemas terrestres y optimizando los tiempos de viaje. No obstante, su aplicabilidad trasciende el ámbito urbano: en el transporte de carga, permiten entregas rápidas y efectivas, particularmente en zonas remotas o de difícil acceso por carretera. En el ámbito de emergencias médicas, se posicionan como puntos estratégicos para la evacuación y el traslado urgente de pacientes críticos hacia centros de atención especializada. Además, en tareas de vigilancia y seguridad, sirven como bases operativas para UAS empleados en monitoreo, rescate y otras misiones críticas, demostrando su versatilidad en diversas aplicaciones.

Las aeronaves VTOL para las que están optimizadas los vertipuertos utilizan múltiples motores y propulsores generalmente eléctricos. Estas aeronaves destacan por ser más silenciosas, eficientes y económicas que los helicópteros tradicionales, pero su operación requiere una infraestructura

especializada. Esto incluye estaciones de recarga para baterías, áreas de mantenimiento y plataformas dedicadas para el despegue y aterrizaje.

Además, los vertipuertos deben contar con sistemas avanzados de comunicación, navegación y vigilancia (CNS) para gestionar de manera eficiente el tráfico aéreo en entornos urbanos densos. Estas tecnologías no solo aseguran la seguridad operativa, sino que también permiten una capacidad significativamente mayor para operaciones simultáneas en comparación con los helipuertos convencionales.

6.2. Tipos de Vertipuertos

Existen numerosas clasificaciones de los vertipuertos en función de la bibliografía que se consulte o de los criterios que se consideren en cuanto al tipo de operación, uso, entorno o configuración.

Atendiendo a su **emplazamiento y los servicios ofrecidos**, los vertipuertos se clasifican en:

- **Vertipuerto “convencional”:** es una infraestructura que se ubicará en puntos de interés y está idealmente integrada con otros modos de transporte terrestre. Puede alojar múltiples aeronaves VTOL, proporcionar carga rápida, reabastecimiento y servicios menores de mantenimiento, junto con servicio de soporte en la gestión de las operaciones. Además, incluirá puntos de control de seguridad, salas de espera para pasajeros, sistemas de seguridad contra incendios y la vigilancia en tiempo real, entre otros.



Ilustración 18. Vertipuerto convencional

- **Vertistop:** cuentan con un único punto de aterrizaje y ofrece una infraestructura limitada de carga y soporte de gestión de operaciones. Los vertistops, por ejemplo, podrían emplazarse en la cima de rascacielos o similares, o esparcirse por todo el

entramado urbano para ofrecer un punto de parada para aeronaves VTOL.



Ilustración 19. Vertistop. [Fuente: <https://ala.aero/es/2022/09/la-faa-publica-estandares-de-diseno-del-vertipuerto-para-respaldar-la-integracion-segura-de-aeronaves-de-movilidad-aerea-avanzada/>]

- **Vertihub:** es un aeropuerto pequeño para aeronaves VTOL, ubicado principalmente en la periferia de áreas urbanas o suburbanas debido a su potencial impacto y, sobre todo, a su necesidad de espacio. Incluirá todos los servicios indicados para el caso de un vertipuerto “convencional”, además de poder ser la base de operaciones para la mayoría de los operadores de UAM, albergando a los gerentes de la propia infraestructura, al personal de gestión de tierra y al personal de mantenimiento de base capaz de realizar mantenimientos pesados, reparaciones y revisiones en las aeronaves UAM.

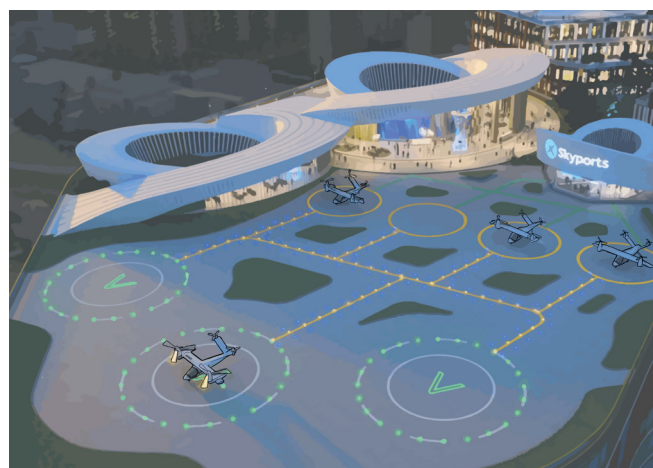


Ilustración 20. VertiHub

Esta clasificación está muy ligada a la UAM y en el Capítulo 5 se complementa la información asociada a estos tipos de infraestructuras.

También se utiliza otra clasificación asociada a sus **características físicas y nivel de equipamiento:**

- **Vertipuertos Básicos:** constan de una superficie de aterrizaje y despegue simple, generalmente en el techo de edificios o en áreas abiertas. Suelen ser de tamaño reducido y son adecuados para operaciones de un volumen bajo en comparación con otros. En cuanto al equipamiento, suelen contar con lo mínimo para prestar los servicios básicos, limitándose a señalización y marcadores visuales básicos e iluminación mínima para operaciones diurnas. Los vertistops encajarían dentro de este grupo de forma general.
- **Vertipuertos Intermedios:** están formados por una superficie de aterrizaje y despegue con capacidad para varios VTOL y espacios designados para estacionamiento temporal de aeronaves. Entre su equipamiento incluirán sistemas de recarga eléctrica para eVTOL, iluminación avanzada para operaciones nocturnas e instalaciones básicas de mantenimiento, siendo adecuados para operaciones urbanas con un volumen moderado de tráfico aéreo.
- **Vertipuertos Avanzados:** contarán con múltiples superficies de aterrizaje y despegue, así como instalaciones extensivas de estacionamiento y hangares para labores de mantenimiento. Incluirían sistemas avanzados de gestión del tráfico aéreo, instalaciones de recarga rápida y automatizada para múltiples aeronaves simultáneamente, sistemas de comunicación y navegación avanzados e instalaciones para el manejo de carga y pasajeros. Este tipo de vertipuerto es ideal para aerotaxis y operaciones de alta densidad en grandes áreas metropolitanas (vertihubs).
- **Vertipuertos Logísticos:** disponen de áreas de aterrizaje y despegue diseñadas para drones y aeronaves de carga, así como instalaciones para almacenamiento y transferencia de mercancías. Su equipamiento contará con sistemas automatizados de carga y descarga, sensores de detección y respuesta para monitorear obstáculos y peligros, así como infraestructura de seguridad avanzada para operaciones autónomas. Están especialmente diseñados para aplicaciones logísticas y entregas rápidas de mercancías.
- **Vertipuertos de Emergencia:** son infraestructuras ubicadas estratégicamente en las proximidades de hospitales y centros de emergencia, que constarán simplemente de una superficie de

aterrizaje y despegue de fácil acceso. Dispondrán de instalaciones médicas básicas para primeros auxilios, sistemas de iluminación y señalización para operaciones nocturnas y en condiciones adversas, así como de equipos de recarga rápida para aeronaves de emergencia. Su uso principal será el transporte rápido de pacientes y suministros médicos en situaciones críticas.

- **Vertipuertos Regionales:** se caracterizarán por ser grandes superficies de aterrizaje y despegue dotadas de hangares y estaciones de recarga para aeronaves de mayor tamaño. Contarán con sistemas completos de gestión del tráfico aéreo regional, espacios para pasajeros y manejo de carga, así como instalaciones para la recarga y mantenimiento de aeronaves eléctricas, que puede incluir las de despegue y aterrizaje corto (eSTOL). Estas instalaciones se crean especialmente para conectar áreas urbanas con regiones periféricas y aeropuertos secundarios.
- **Vertipuertos Integrados:** son instalaciones que se integran con infraestructuras de transporte terrestre como estaciones de metro y autobuses. Se conciben como estructuras arquitectónicas avanzadas para minimizar el impacto visual y acústico en entornos urbanos. Estarán equipados, al menos, con sistemas de comunicación y gestión del tráfico aéreo integrados con redes de transporte urbano, junto con instalaciones para pasajeros como salas de espera y otros servicios adicionales. Su diseño facilita la conexión entre diferentes medios de transporte, proporcionando un flujo continuo y eficiente para los viajeros urbanos e internacionales.

Adicionalmente, existen otras clasificaciones generales asociadas a su ubicación (vertipuertos a nivel de superficie o elevados), por el tipo de operación (para operaciones tripuladas o no tripuladas) o su uso específico (comerciales o no comerciales) y por entorno de ubicación (en áreas congestionadas o urbanas o en áreas no congestionadas o regionales), entre otros.

6.3. Configuración física de los vertipuertos y equipamiento

Al igual que las infraestructuras destinadas a prestar soporte a las operaciones aéreas de aeronaves tripuladas, los vertipuertos tienen una serie de características y elementos comunes entre ellos. Aquellos familiarizados con los helipuertos comprobarán la similitud existente entre los elementos que constituyen un vertipuerto y los propios de un

heliuerto, ya que los primeros se inspiran en estos últimos. De forma no exhaustiva los elementos característicos que forman un vertipuerto se podrían resumir en los siguientes:

- **Área de Aterrizaje y Despegue (TLOF):** Es el área, pavimentada y resistente a cargas, donde la aeronave toma tierra y despegue. De nuevo se trata de un elemento derivado de los helipuertos actuales.
- **Área de Aterrizaje y Despegue Final (FATO):** Es el área sobre la cual se completa la fase final de la maniobra de aproximación para el aterrizaje y desde la cual se inicia la maniobra de despegue.
- **Zona de Seguridad (SA):** Área alrededor del FATO destinada a reducir el riesgo de daños a aeronaves en caso de salirse del FATO.

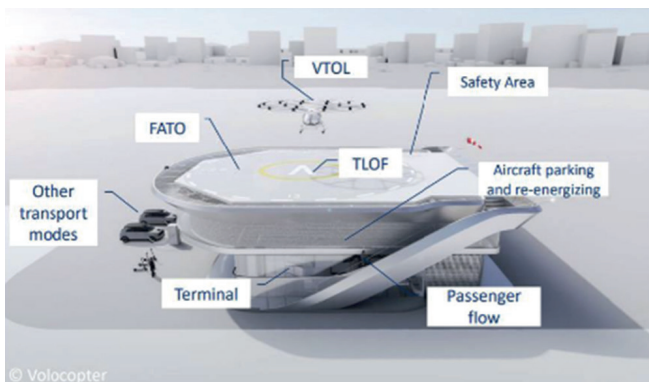


Ilustración 21. Configuración física de un vertipuerto [Fuente: Volocopter].

Junto a estos elementos principales aparecen otros destinados a proporcionar soporte a la operación, como:

- **Edificios terminales orientados al pasajero y pasarelas:** Estos elementos estarán fuera del área de movimiento y proporcionarán acceso al pasajero para embarcar y desembarcar la aeronave.
- **Calles de rodaje y puertas:** Permiten el movimiento de la aeronave desde el área de estacionamiento hasta el área de despegue.

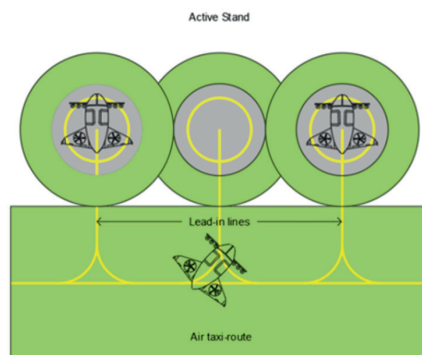


Ilustración 22. Vertipuerto con calles de rodadura y estacionamientos [Fuente: EASA].

- **Áreas de estacionamiento y posiciones de preparación:** Estas áreas están destinadas a la recarga de energía (o abastecimiento de combustible en algunos casos), mantenimiento de la aeronave y amarre de la aeronave.
- **Señalética vertical y horizontal:** Señales y marcas en el suelo para guiar a las aeronaves y asegurar la correcta operación.

Por último, existirán una serie de instalaciones específicas en función de la finalidad del vertipuerto, como, por ejemplo, controles de seguridad y acceso, conexiones físicas con otros medios de transporte, muelles de carga, bloque técnico para albergar oficinas del gestor de la infraestructura, central eléctrica, etc.

En lo que se refiere a su equipamiento, los vertipuertos también presentan una amplia variedad de equipamiento en función de la misión a la que están destinados. De manera general se pueden resumir en los siguientes:

- **Sistemas de iluminación:** luces de pista, luces de aproximación y luces de señalización de obstáculos, para garantizar la seguridad de las operaciones nocturnas o en condiciones de baja visibilidad.



Ilustración 23. Ejemplo FATO con sistema de iluminación [Fuente EASA].

- **Sistemas de comunicación:** Radios y otros dispositivos de comunicación digitales para mantener contacto entre el control de tráfico aéreo y las aeronaves.

- **Sistemas de navegación:** Equipos de ayuda a la navegación, como sistemas de guía de aproximación, si bien se prevé que el principal medio de navegación sea el basado en guiado satelital.
- **Equipamiento meteorológico:** como mangas de viento, anemómetros y otros medios de observación de las condiciones meteorológicas locales.
- **Sistemas de extinción de incendios:** Equipos y sistemas para la prevención y extinción de incendios, incluyendo vehículos de bomberos y extintores.



Ilustración 24. Entrega de paquetería en el tejado de un entorno urbano [Imagen generada con IA].

CONCLUSIONES

En este capítulo se ha explicado cómo el entorno aéreo moderno enfrenta retos cada vez más complejos debido a la proliferación de nuevas tecnologías, los UAS y la movilidad aérea urbana (UAM). Se ha presentado un resumen del contexto normativo europeo y nacional que aplica a los UAS civiles. Este contexto, no sólo es de reciente creación, sino que está en un proceso de revisión y evolución arrastrado por la impresionante ebullición que sufre el sector en la actualidad.

Pero la gran fuerza con la que empuja el sector no ha conseguido reducir los niveles de seguridad operacional y física ni la preocupación por la protección de datos que rigen en la aeronáutica civil tradicional, sino que están obligando a desarrollar y apostar por nuevas soluciones que se aprovechen de las capacidades actuales de digitalización y automatización de todo tipo de sistemas para mejorar la eficiencia de las operaciones.

Aún está por perfilarse la solución final respecto a cómo va a lograrse la integración segura de las nuevas operaciones como aerotaxis o movilidad aérea urbana (UAM) en el espacio aéreo, pero en Europa ya empieza a tomar forma la adopción de su Gestión del Tráfico de Sistemas de Aeronaves no Tripulada (UTM) en el U-Space.

El U-Space, aún se encuentra en una fase temprana de definición y no se sabe en qué medida va a afectar al escenario operacional aeronáutico civil convencional. Recientemente se han definido las primeras zonas geográficas en las que se han establecido determinadas condiciones de uso para los UAS civiles, y se han definido los primeros escenarios operacionales para agilizar la operación de ciertos operadores de UAS civiles que, de otra forma, tendrían que recurrir al proceso de elaborar análisis de riesgos y solicitudes de autorización para llevar a cabo sus misiones.

En los últimos años se está invirtiendo un gran esfuerzo en la definición de estas soluciones; se han presentado opciones novedosas como las DFR que propone un nuevo conjunto de reglas de vuelo digitales, o distintos tipos de vertipuertos como posibles escenarios de aterrizaje y despegue de drones que puede que en los próximos años cambien el escenario urbano tal como se conoce actualmente.

El escenario operacional que se vaya configurando finalmente dependerá de las características de las soluciones que acaben imponiéndose. Todas ellas tienen como objetivo principal la integración de las operaciones de UAS en el escenario operacional de la aeronáutica tradicional de la forma más eficiente, segura y económica posible. Y para ello se valen de la automatización, digitalización e interoperabilidad de los sistemas que ofrecen las evoluciones tecnológicas actuales.

The screenshot displays the ENAIRE Drones web application interface. At the top, there is a search bar with the text "Introduzca localidad o coordenadas" and a magnifying glass icon. Below the search bar, a blue "Información" (Information) pop-up window is open, displaying flight restrictions for a 120m altitude. The pop-up contains the following text:

Restricciones para su operación. Ha seleccionado: Altura de Vuelo sobre suelo (m): 120 - Vuelo fotográfico/video
Cálculo realizado el 11/7/2025, 8:40:18

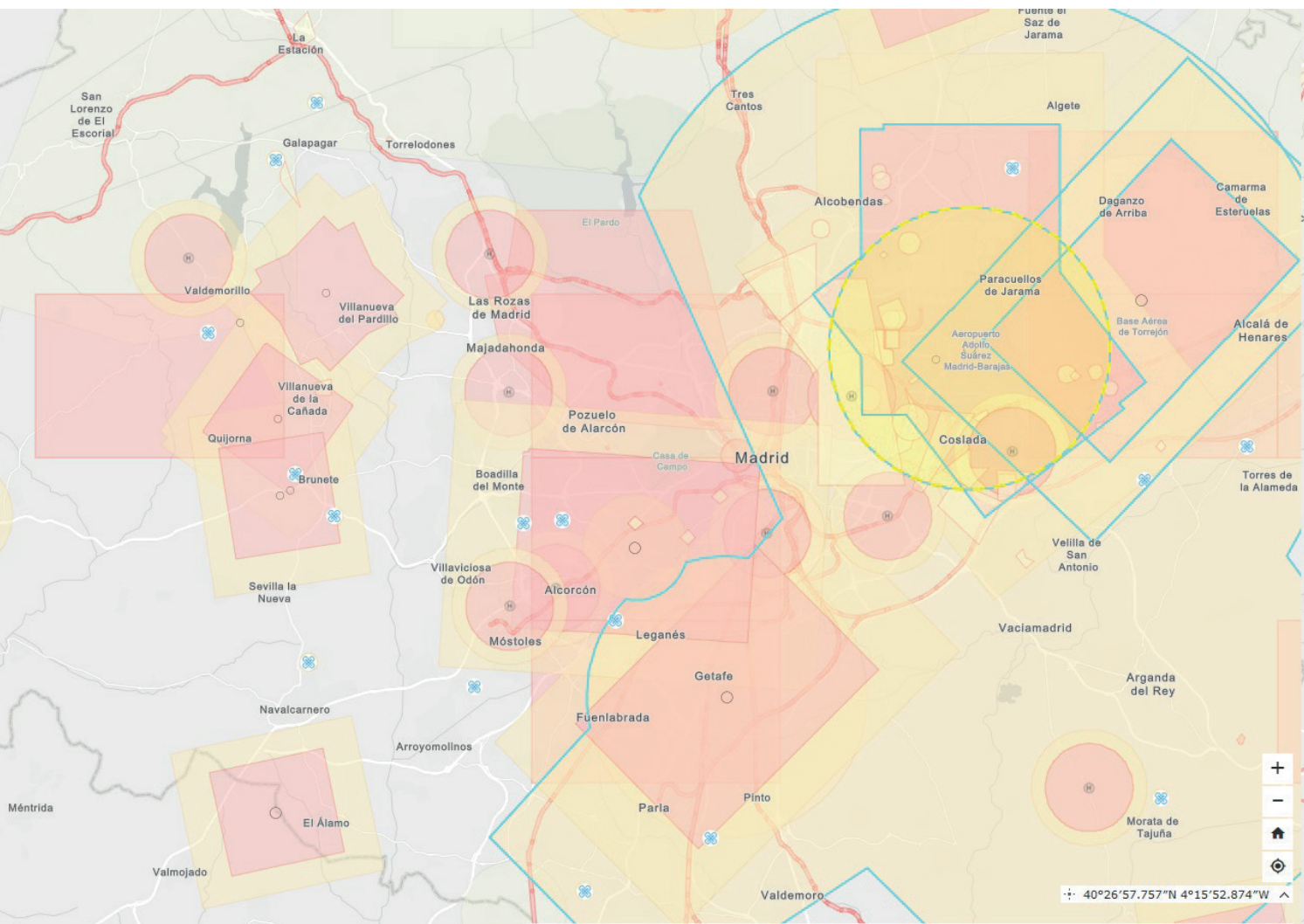
Se encuentra en una zona geográfica de UAS general por razón de la seguridad operacional del espacio aéreo controlado ATZ MADRID/BARAJAS.
Están **permitidas las operaciones VLOS a una altura máxima de 60m fuera de las ZGUAS generales por razón de la seguridad operacional en el entorno de los aeródromos.**
Para cualquier otra operación realice su solicitud a través del contacto indicado. Contacto: [ENAIRE Planea](#).

Se encuentra en una zona geográfica de UAS general por razón de la seguridad operacional del espacio aéreo controlado CTR MADRID.
Están **permitidas las operaciones VLOS a una altura máxima de 60m fuera de las ZGUAS generales por razón de la seguridad operacional en el entorno de los aeródromos.**
Para cualquier otra operación realice su solicitud a través del contacto indicado. Contacto: [ENAIRE Planea](#).

Se encuentra en la Zona geográfica de UAS General por razón de la seguridad operacional de MADRID/Torrejón , LETO.
Por debajo de 45m medidos desde el punto de referencia del aeródromo (617.67m), no es necesario coordinar la operación.
Por encima de 45m, medidos desde el punto de referencia del aeródromo (617.67m), **NO permitido el vuelo a drones excepto coordinación con el Aeródromo.**
Contacto: Oficina ATC de Torrejón. Email.: leto@ea.mde.es

Se encuentra en la Zona Geográfica de UAS General por razón de la seguridad operacional de MADRID/Adolfo Suárez Madrid-Barajas , LEMD.
NO permitido el vuelo a drones excepto coordinación con el Aeródromo. Realice su solicitud **ÚNICAMENTE** a través del contacto indicado, al menos 20 días hábiles antes de la fecha de su actividad. AENA coordinará con el proveedor de servicios ATS de tierra (ENAIRE, SAERCO o SKYWAY) su operación.

At the bottom of the interface, there is a status bar that reads "mapa actualizado a 10/7/2025" and a gear icon followed by "Altura de Vuelo sobre suelo (m): 120".



Representación de Zonas Geográficas de UAS de la aplicación ENAIRE Drones (Fuente: <https://drones.enaire.es/>).

REFERENCIAS

1. Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM) – A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization Edition 3 – ICAO.
2. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Traffic Management (UTM) Implementation Plan Version 1.8 FAA Reauthorization Act of 2018 (Pub. L. No. 115-254) – Section 376 (FAA Aviation Safety) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/PL_115-254_Sec376_UAS_Traffic_Management.pdf)
3. U-SPACE CONCEPT OF OPERATIONS (CONOPS) -Fourth Edition (SESAR-JU CORUS-XUAM D4.220 July 2023 – Edition 01.00.02) (<https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20CONOPS%204th%20edition.pdf>)
4. Concepts of Airspace Structures and System Analysis for UAS Traffic flows for Urban Areas (AIAA SciTech Forum 9 13 January 2017, AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace)
5. Metropolis: Relating Airspace Structure and Capacity for Extreme Traffic Densities (hal.science) (HAL Id: hal-01168662 <https://enac.hal.science/hal-01168662v1> Submitted on 26 Jun 2015)
6. Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts and approaches Aleksandar Bauranov a, Jasenka Rakas (August 2021)
7. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/space-traffic-management_en
8. <https://movilidadelectrica.tech/futuras-reglas-de-vuelo-en-el-espacio-aereo-mas-reducido-ifr-digital-o-mejorada/>
9. Sky For All. Sustainable Aviation Growth for All. July 2023. <https://skyforall.directus.app/assets/0b3957f5-e224-44a5-922b-f688fc0ba8a1.pdf>
10. https://www.rtca.org/wp-content/uploads/2023/12/RTCA-FDF-White-Paper_FNL-1.pdf
11. <https://nari.arc.nasa.gov/skyforall/>
12. <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/drones?page=1>
13. Real Decreto 517/2024, de 4 de junio, por el que se desarrolla el régimen jurídico para la utilización civil de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), y se modifican diversas normas reglamentarias en materia de control a la importación de determinados productos respecto a las normas aplicables en materia de seguridad de los productos; demostraciones aéreas civiles; lucha contra incendios y búsqueda y salvamento y requisitos en materia de aeronavegabilidad y licencias para otras actividades aeronáuticas; matriculación de aeronaves civiles; compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos; Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea; y notificación de sucesos de la aviación civil.

14. Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. [Disposición Derogada]
15. Plan de Acción Nacional para el Despliegue del U-Space 2022-2025. (PANDU)
16. AIP España. (<https://aip.enaire.es/AIP/#ENR>).
17. Commission Implementing Regulation (EU) No 923/2012 of 26 September 2012 laying down the common rules of the air and operational provisions regarding services and procedures in air navigation and amending Implementing Regulation (EU) No 1035/2011 and Regulations (EC) No 1265/2007, (EC) No 1794/2006, (EC) No 730/2006, (EC) No 1033/2006 and (EU) No 255/2010. [Conocido por SERA (Standardised European Rules of the Air)]
18. Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión, de 12 de marzo de 2019, sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas.
19. Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 de mayo de 2019, relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas.
20. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 de la Comisión, de 22 de abril, sobre un marco regulador para el U-Space;
21. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/665 de la Comisión, de 22 de abril, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2017/373 en lo que respecta a los requisitos para los proveedores de servicios de gestión del tránsito aéreo/navegación aérea y otras funciones de la red de gestión del tránsito aéreo en el espacio aéreo U-Space designado en el espacio aéreo controlado;
22. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/666 de la Comisión, de 22 de abril, por el que se modifica el Reglamento (UE) 923/2012 en lo que se refiere a los requisitos para la aviación tripulada que opera en el espacio aéreo U-Space.
23. Reglamento Delegado (UE) 2024/1107 de la Comisión, de 13 de marzo de 2024, que completa el Reglamento (UE) 2018/1139 del Parlamento Europeo y del Consejo mediante el establecimiento de normas detalladas para el mantenimiento de la aeronavegabilidad de los sistemas de aeronaves no tripuladas certificados y sus partes constitutivas, y relativo a la aprobación de las organizaciones y el personal que participan en dichas tareas.
24. Reglamento de Ejecución (UE) 2024/1109 de la Comisión, de 10 de abril de 2024, por el que se establecen disposiciones de aplicación del Reglamento (UE) 2018/1139 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que se refiere a los requisitos de las autoridades competentes y los procedimientos administrativos para la certificación, la supervisión y la ejecución del mantenimiento de la aeronavegabilidad de los sistemas de aeronaves no tripuladas certificados, y se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2023/203.
25. Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems. Revision from July 2024. EASA (<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu>)



Dron en servicio policial [imagen generada con IA].

Sistemas Anti-Dron

María Anta García
Carolina Goy Naranjo

El incremento que ha experimentado el número de sistemas aéreos no tripulados (UAS), conocidos popularmente como drones, unido a la mejora significativa de sus capacidades y su accesibilidad a cualquier operador privado, ha provocado algunas situaciones potencialmente peligrosas en las proximidades de infraestructuras críticas o en eventos multitudinarios, como partidos de fútbol, conciertos, manifestaciones o festivales, muy sensibles a estas amenazas.

Esta proliferación, casi incontrolada, de UAS sobre todo de pequeño tamaño, ha implicado la existencia de drones intrusos en espacios aéreos donde no deberían operar e incluso su utilización con fines malintencionados (contrabando, perturbación intencionada, vigilancia y reconocimiento, etc...). Por ello, la protección anti-dron es clave en la seguridad de las infraestructuras críticas y de las personas y bienes, en general.

La mayoría de los incidentes registrados han sido causados por el uso negligente, debido al desconocimiento de las regulaciones existentes sobre el uso de drones. Sin embargo, las crecientes capacidades de estas aeronaves plantean preocupaciones de seguridad y no se debe descartar la posibilidad de su uso por actores maliciosos.

Los sucesos de avistamientos de drones sobrevolando una planta nuclear en Suecia (Forsmark, enero 2022), una planta de gas en Noruega (Kaarstoe, octubre 2022) o en eventos deportivos en Inglaterra (partido de la Premier League en el St. Mary's Stadium de Southampton, enero 2023) y en EEUU (partido de la NFL en el M&T Bank Stadium de Baltimore, enero 2024), son ejemplos de cómo la tecnología anti-dron se está volviendo aún más necesaria en el ámbito civil.

Como parte de estos eventos, son representativas las intrusiones de UAS en aeropuertos como Gatwick y Heathrow (diciembre 2018), Changi de Singapur (junio 2019), Dublín (febrero 2023), Madrid-Barajas (marzo 2023) y Frankfurt (septiembre 2023), por su significativo impacto operacional, causando el cierre de sus pistas, paralizando las operaciones aéreas, ocasionando el retraso y cancelación de vuelos programados y generando grandes pérdidas económicas, tanto para las compañías aéreas y gestores aeroportuarios como para los usuarios, además del incremento del riesgo para la seguridad de las aeronaves tripuladas.

Por lo tanto, es necesario abordar la amenaza potencial que pueden representar los UAS no cooperativos, que se utilizan con fines maliciosos o por negligencia, atendiendo al distinto uso que pueden tener y a la diversidad de objetivos que hay que proteger. El riesgo derivado de la operación irregular de los UAS se debe conocer y analizar para poder implementar sistemas de seguridad integrados, capaces de detectar, rastrear, identificar y, cuando fuera necesario, neutralizar cualquier posible amenaza que se presente.

En el ámbito de la aviación civil, y debido al importante impacto operacional que pueden causar los incidentes protagonizados por UAS, se definen procedimientos de respuesta coordinada entre las autoridades competentes de aviación civil, las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad (FFCCS), los gestores aeroportuarios, los proveedores de servicios de navegación aérea y los operadores aéreos.

El presente capítulo aborda las amenazas que plantean los drones diseñados para uso civil y cómo se pretende hacer frente a las amenazas de estos drones en dicho entorno.

NOTA: Por razones de confidencialidad, la información contenida en este capítulo está limitada a la que puede difundirse al dominio público.



1. DEFINICIÓN DE LA AMENAZA: CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RIESGOS

Los principales documentos estratégicos sobre la seguridad nacional reconocen la amenaza que supone el empleo de drones para realizar acciones agresivas o terroristas. De hecho, en zonas de conflicto, las capacidades de grupos terroristas utilizando este tipo de aeronaves ya son conocidas.

Los incidentes protagonizados por drones en infraestructuras críticas, eventos multitudinarios o en distintos aeropuertos en los últimos años, han puesto de manifiesto que la existencia de drones intrusos supone un riesgo evidente.

Los drones deberían considerarse, esencialmente, como una aeronave más, por lo tanto, los requisitos, responsabilidades y procedimientos en los que se basa el control de las aeronaves tripuladas deberían ser también válidos para las aeronaves no tripuladas. Sin embargo, debido a las características anteriormente mencionadas, es evidente que el sistema tradicional de gestión del tráfico aéreo no es totalmente efectivo para su control. Por ello, estas aeronaves no tripuladas deberán estar sujetas a ciertas restricciones de operación.

Diversos estudios han señalado que los drones comerciales comunes con gran capacidad de carga útil, usados de manera negligente o malintencionada, pueden causar daños graves para la seguridad física, incluso a bajas velocidades.

Para dar una respuesta adecuada a estas amenazas se deben analizar los casos o escenarios de uso. Las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad son responsables de contrarrestar esos usos indebidos, previniendo, detectando, identificando e incluso neutralizándolos, si es necesario.

1.1. Caracterización de la amenaza

Como se ha indicado, existen múltiples clasificaciones y categorías de UAS en función del peso, altitud de vuelo, alcance, uso específico. Sin embargo, la clasificación más utilizada es la que tiene en cuenta el peso máximo de despegue.

Los UAS requieren huellas logísticas muy reducidas por lo que su operación suele ser repentina, difícil de detectar y con

procedencia indeterminada. Su perfil de operación puede ser asistido por un piloto o de forma autónoma. Adicionalmente, con el desarrollo de los sistemas expertos y de inteligencia artificial, se ha observado un importante avance en los sistemas de navegación ultra autónomos. Además, los UAS operan en condiciones extraordinariamente flexibles y de amplio espectro por su envolvente de altitud de vuelo, rango de velocidades, maniobrabilidad y capacidad de operar independientemente de las condiciones meteorológicas.

La caracterización de la amenaza se focaliza en aquellos UAS que, debido a sus características de reducida superficie radar equivalente¹, baja firma infrarroja y/o acústica, o vuelo a baja altura y velocidad, denominados UAS LSS², provocan que su detección, seguimiento, identificación y neutralización con la actual tecnología sean limitadas. Además, su flexibilidad operacional (individual o en enjambres) hace de estos dispositivos un factor relevante a considerar.

Las principales características de la amenaza UAS son:

- dispositivos al alcance de muchos;
- precio asequible;
- despliegue rápido;
- tamaño reducido;
- capacidad de carga útil;
- no se requieren altos conocimientos para su pilotaje; y disponibilidad de tutoriales para su manipulación en internet.

En resumen, la principal amenaza en el ámbito civil son los drones comerciales (DJI, PARROT, YUNEEC, AUTEL, XIAOMI, UAS con protocolo WIFI) denominados habitualmente como UAS LSS.

1.2. Evaluación de amenazas. Análisis de riesgos a nivel nacional

La proliferación del uso ilícito de UAS, que pueden paralizar el funcionamiento de aeropuertos o infraestructuras críticas, y que son además potenciales armas para sabotajes o acciones terroristas, requiere por parte de las autoridades competentes la realización de un análisis de riesgos para poder proporcionar una respuesta tecnológica adecuada según el tipo de instalación o actividad que se quiere proteger.

Para cada escenario de amenaza, se considerará y evaluará el modus operandi (tipo de ataque) relevante, incluidos los perpetrados con un propósito deliberado, malicioso e intencional, así como los incidentes causados

1. La superficie radar equivalente es el área de una esfera hipotética que reflejaría la misma cantidad de energía de vuelta al radar que el objeto real, y da la medida de cuán detectable es un objeto por un radar.
2. UAS LSS (Low, Slow, Small).

por personas imprudentes o despistadas. En la evaluación del riesgo de cada uno de los escenarios de amenaza identificados se procederá a valorar cada una de las variables de probabilidad (intención y capacidad de los atacantes de llevar a cabo el escenario de amenaza), consecuencias (el impacto que tendría la materialización de la amenaza) y vulnerabilidad (valoración de las medidas de seguridad ya implementadas).

Este ejercicio proporcionará una imagen clara de cuáles son los escenarios de amenaza plausibles y los riesgos que afrontan las instalaciones a proteger, para finalmente identificar las contramedidas necesarias que logren reducir la vulnerabilidad de dichas instalaciones.

Por lo tanto, al realizar el análisis de riesgos las autoridades competentes deberán añadir, al resto de amenazas ya conocidas, las incursiones negligentes y los actos de interferencia ilícita o malintencionados, siguiendo las metodologías de riesgos internacionales utilizadas en seguridad de la aviación, para evaluar los riesgos que plantean los UAS no cooperativos contra la aviación civil y los aeropuertos.



Ilustración 1 Fases del análisis de riesgos

El análisis de riesgos debe revisarse y actualizarse periódicamente con información proporcionada por datos provenientes de incidentes de UAS e información de inteligencia.

2. SISTEMAS Y CAPACIDAD C-UAS: TECNOLOGÍAS ANTI-DRON

Las tecnologías C-UAS (Counter-UAS) se refieren a los sistemas que se utilizan para detectar y, cuando sea necesario, neutralizar, la amenaza que representa el empleo imprudente y/o malicioso de aeronaves no tripuladas. Estos sistemas están compuestos por diferentes sensores y presentan una interfaz de mando y control e, incluso, en el ámbito militar, están provistos de un sistema de armas.

Estos sistemas se diseñan para las diferentes fases de lo que se denomina Ciclo C-UAS: prevención, detección, identificación, decisión y neutralización.

Los sistemas **C-UAS** pueden dividirse o clasificarse en las siguientes categorías:

Por el tipo de solución proporcionada y tecnología empleada:

- **Sistemas de detección y seguimiento:** las principales tecnologías empleadas son: radar, radiofrecuencia (RF), sensores electro-ópticos (EO), infrarrojos (IR) y acústicos.
- **Sistemas de neutralización:** se pueden clasificar, a su vez, según dos criterios.

Según la finalidad de la contramedida empleada:

- Sistemas de interrupción o interferencia del control: orientados a romper o afectar la comunicación entre el dron y su operador.
- Sistemas de captura: permiten atrapar al dron sin que se estrelle.
- Sistemas cuya finalidad es destruir el dron: incluyen medidas tanto cinéticas como no cinéticas (armas de energía dirigida), orientadas al derribo e inhabilitación del dron.

Según el tipo de tecnología empleada:

- Cinéticos (redes y proyectiles),
- No cinéticos que se centran en la interferencia, que implica la interrupción de la señal de radiofrecuencia entre el dron y su operador o la interferencia de su enlace GPS.

Por el tipo de plataforma:

- **Basadas en tierra** (ground-based): sistemas diseñados para ser utilizados desde una estación fija o móvil en tierra. Esta categoría incluye sistemas instalados en sitios fijos, sistemas móviles, y sistemas montados en vehículos móviles.
- **Portátiles o de mano** (hand-held): sistemas diseñados para ser operados por una persona o por sistemas automatizados muy simples que no requieren grandes infraestructuras. Muchos de estos sistemas se asemejan a rifles u otras armas pequeñas.
- **Basada en UAS:** sistemas diseñados para ir instalados en un UAS, el cual puede estar ubicado en las proximidades del objetivo.

Por el tipo de respuesta de mitigación empleado:

- **Softkill:** implica cortar la comunicación del dron con su piloto o fuente, para lo cual, se interfiere o bloquea la señal de comunicación. En general, el dron está programado para volar de regreso a su lugar de despegue. Esta es una forma no invasiva de detener

un dron o un enjambre de drones, sin ningún daño físico al dron o su entorno.

- **HardKill:** implica incapacitar físicamente al dron, para lo cual, se derriba directamente.

2.1. Fases de la capacidad C-UAS

La capacidad C-UAS está dividida en varias fases, y por tanto necesita poder detectar, identificar y discriminar los drones autorizados y con fines no maliciosos, de aquellos otros no autorizados, de uso malicioso o que, en un momento dado se convierten en una amenaza o un riesgo para la seguridad. Todo ello debe hacerse en el mínimo tiempo posible. Una vez discriminados los drones que sean calificados como amenaza, es necesario disponer de la capacidad para neutralizarlos lo antes posible y siempre antes de que alcancen el supuesto objetivo, teniendo presente que el tiempo disponible para tomar la decisión de actuar es muy reducido.

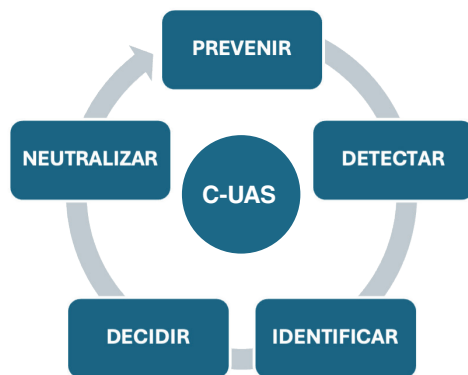


Ilustración 2 Ciclo C-UAS

- **Prevención:** selección de contramedidas pasivas que proporcionen alertas tempranas de la presencia de un dron, protejan las instalaciones conduciendo a las personas a un lugar seguro, bloqueen las zonas sensibles a la vista, desconectando partes de la infraestructura informática y buscando drones u objetos caídos de drones.
- **Detección:** los sistemas C-UAS alertarán al operador de que un dron se encuentra en una zona de alerta designada previamente. Una vez detectado, el sistema será capaz de seguir su trayectoria y la ubicación del piloto remoto, proporcionando al operador información sobre su situación.
- **Identificación:** el sistema también podría identificar el modelo del dron, proporcionando información sobre su alcance, velocidad y capacidades de carga útil.

- **Decisión:** el operador puede etiquetar el dron detectado e identificado como amigo o enemigo, lo que permite a los drones autorizados seguir operando sin interrupción del C-UAS, y realiza la discriminación de drones autorizados y con fines no maliciosos, de aquellos otros no autorizados, de uso malicioso o que en un momento dado se convierten en una amenaza o un riesgo para la seguridad, y todo ello en el mínimo tiempo posible.
- **Neutralización:** el sistema podría neutralizar la amenaza mediante sistemas integrados en las antenas fijas que se emplazan en puntos estratégicos para lograr la mejor cobertura o el empleo de sistemas portátiles.

Los sistemas C-UAS actuales están basados en el uso de diferentes técnicas, usadas individualmente o, como fórmula más adecuada, utilizando una mezcla de ellas, consistentes en atacar las vulnerabilidades de los subsistemas de funcionamiento de los drones. Por lo que, para cada una de las fases descritas anteriormente, se seleccionarán las tecnologías y/o sensores disponibles en el mercado o en proceso de desarrollo. Sin embargo, en el momento de definir cuál de estas se adapta más a las necesidades de cada área objeto de protección, deberán considerarse las ventajas e inconvenientes que presenta cada tipo de sensor, especialmente en lo relacionado con la posible interferencia que pueda generarse en las comunicaciones u otros sistemas de la instalación que utilicen ondas electromagnéticas.

La solución tecnológica seleccionada será, normalmente, una combinación de sensores, empleando un enfoque por capas, centrándose en la detección, el seguimiento y la mitigación.

Por lo tanto, inicialmente, una combinación de sensores activos y pasivos proporcionará información de geolocalización, elevación, frecuencia, tipo de protocolo y modelo del dron. En la siguiente fase, los sistemas electroópticos/infrarrojos (EO/IR) proporcionarán información visual sobre el dron, identificando el tipo de carga útil que lleva (armas, cámaras o contrabando).

Muchas contramedidas utilizadas para la neutralización de los drones requieren permisos legales o autorizaciones para su aplicación o están reservadas para el uso exclusivo de las Fuerzas Armadas o las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad.

2.2. Sistemas de detección y seguimiento

La detección puede llevarse a cabo de forma activa o pasiva. Los sistemas C-UAS actuales están basados en las

siguientes tecnologías, de manera individual o conjunta, para atacar las vulnerabilidades de los subsistemas de funcionamiento de los drones:

- **Detección de Radio Frecuencias de trabajo (RF):** detecta, localiza y, en algunos casos, identifica UAS cercanos escaneando las frecuencias en las que sabe que operan la mayoría de los enlaces de datos de este tipo de sistemas.

Se trata de un sensor que dispone de antenas para identificar radiofrecuencias y ondas de radio. No ofrecen ninguna capacidad de detección contra las amenazas silenciosas o no emisoras.

- **Detección de la firma radar, huella térmica y acústica:** la firma radar de un dron varía significativamente según varios factores que, combinados, determinan dicha firma y su detectabilidad en diferentes escenarios.

- **Tamaño:** drones más grandes tienden a reflejar más señales de radar, lo que los hace más detectables (la sección transversal radar -RCS- aumenta con el tamaño del dron).
- **Forma:** la geometría del dron influye en cómo se reflejan las señales de radar.
- **Materiales de construcción:** los materiales metálicos reflejan mejor las señales de radar, aumentando la detectabilidad, mientras que los materiales compuestos o plásticos pueden absorber o dispersar las señales, reduciendo la firma radar.
- **Ángulo de incidencia:** la orientación del dron respecto al radar afecta la cantidad de señal reflejada.

Por otra parte, la huella térmica se mide utilizando cámaras térmicas, que detectan la radiación infrarroja emitida por el dron.

En cuanto a las características acústicas más relevantes para la detección se incluyen la frecuencia, intensidad, patrón del ruido y direccionalidad del sonido emitido por el dron debido a sus motores y hélices:

- **Sistemas acústicos de detección:** detectan UAS al reconocer los sonidos únicos producidos por sus motores. Se basan en una biblioteca de sonidos producidos por UAS conocidos que luego se comparan con sonidos detectados en el entorno operativo.

- Utilizan micrófonos optimizados para búsqueda de una firma acústica específica correspondiente a los rotores y motores de los UAS. La comparación del tiempo de llegada de la onda sonora se utiliza para calcular la dirección y, con varios sensores operando de manera colaborativa, es posible obtener posición y curso de vuelo mediante triangulación.

- **Sistemas Electro Ópticos (EO) y de Infrarrojos (IR):** identifican y rastrean UAS en función de su firma visual o huella térmica, respectivamente. Es un dispositivo capaz de percibir los cambios de luz y puede grabar imágenes y vídeo.

- Estos sistemas son esenciales para verificar la amenaza antes de aplicar cualquier contramedida.

- **Sistemas de radares adaptados a baja altitud:** Detectan la presencia de UAS LSS por su firma radar, generada cuando la aeronave encuentra pulsos de radiofrecuencia emitidos por el elemento de detección. Dentro de los sistemas de detección activa, el más frecuente es el radar.

Estos sistemas a menudo emplean algoritmos para distinguir entre UAS y otros objetos pequeños, como pájaros. Un radar envía una señal, y luego capta el reflejo, y utiliza esta información para medir la dirección y la distancia.

Los radares más utilizados en aplicaciones C-UAS, son:

- **Monoestático pulsado** (radar que no sólo puede medir el rumbo, distancia y altitud de un objeto, sino también su velocidad);
- **Onda continua modulada (FMCW frequency-modulated continuous wave radar,** es un tipo especial de sensor de radar que emite una señal de transmisión continua como un radar de onda continua simple);
- **Biestático** (el emisor y el receptor están separados);
- **Biestático pasivo** (detecta y rastrea objetos procesando reflejos de fuentes no cooperativas de iluminación en el entorno); y
- **Radar 3D** (da cobertura en las tres dimensiones, proporcionando distancia, dirección y elevación del blanco).

El radar monoestático usa la misma antena para transmisión y recepción, por lo que la recepción está temporalmente inhibida mientras transmite,

generando un cono ciego temporal. El FMCW no tiene ese cono ciego, pero es vulnerable a su propia interferencia. Los biestáticos compensan las anteriores desventajas separando las antenas, lo que genera nuevos inconvenientes.



Ilustración 3. Sensores y antenas portátiles

Adicionalmente, estas tecnologías de detección se complementan con:

- Utilización de inteligencia artificial para la discriminación de los drones sobre otros objetos cercanos.
- Discriminación de drones basada en los sistemas de gestión del uso de drones (U-Space, registro electrónico, etc.).
- Sensores combinados: muchos sistemas integran una variedad de diferentes tipos de sensores para proporcionar una mayor capacidad de detección seguimiento e identificación.

La detección de las amenazas se complementa con sistemas que permitan una adecuada explotación de la información recibida. El tratamiento de esta información permitirá:

- Generar alarmas ante la detección de un dron en una zona previamente definida, ya sea por la trayectoria, con motivo del comportamiento hostil identificado o ante una posible colisión.

- Desarrollar mapas de calor en base a estadísticas de trayectorias detectadas previamente, analizar tendencias (mayor incidencia en fin de semana, zonas de avistamientos, altitud, condiciones meteorológicas).
- Identificar desviaciones respecto al plan de vuelo (drones amigos o autorizados).

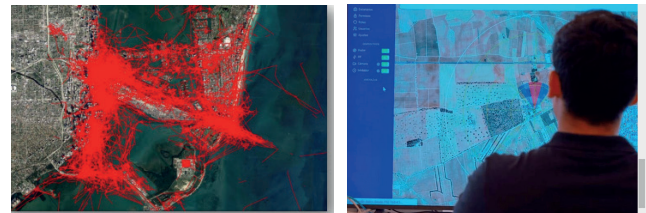


Ilustración 4 Presentación de datos

Otro aspecto que considerar es la clasificación e identificación del dron, por lo que se debe disponer de una base de datos actualizada continuamente con la información de los protocolos de comunicaciones proporcionada por los fabricantes.

2.3. Sistemas de neutralización (cinéticos y no cinéticos)

Una vez discriminados los drones que sean calificados como amenaza, es necesario disponer de la capacidad para neutralizarlos lo antes posible y siempre antes de que alcancen el supuesto objetivo, teniendo presente que el tiempo disponible para tomar la decisión de actuar es muy reducido.

Las contramedidas activas son capaces de detener, capturar y/o destruir los drones en vuelo. La respuesta de derribo y destrucción del dron no siempre resulta la solución más adecuada, especialmente en un entorno civil muy sensible al daño colateral.

Dentro de los tipos de tecnología o estrategia utilizada para neutralizar los drones se destacan:

- **Cinéticos:** son sistemas de neutralización física que incluyen los rifles láser, los sistemas lanza-redes, el uso de aves de presa o disparo de proyectiles (con

munición convencional, cuya eficacia depende del impacto directo, o con munición de ráfaga de aire, programada para explotar cerca del objetivo).

En el caso del láser, se trata de un dispositivo óptico que proyecta un potente haz de luz o energía radioeléctrica sobre el dron. Destruye segmentos vitales de la aviónica del UAS usando energía dirigida, lo que provoca que el dron impacte contra el terreno. Dependiendo de la potencia del láser, puede quemar o cegar el hardware o la cámara.

También se considera el “snagging”, redes expulsadas desde otras aeronaves pilotadas remotamente o desde elementos ubicados en tierra con el fin de capturar el UAS en vuelo y obligarlo a aterrizar de manera controlada.



Ilustración 5 Sistemas de neutralización cinéticos

- **No cinéticos:** son sistemas de inhibición de las frecuencias utilizadas para el control del dron o de perturbación de la señal de navegación (GPS/GNSS); los más destacables son:
 - *Hacking:* empleo de software malicioso que ataca las vulnerabilidades de seguridad en sistemas o redes necesarios para la operación del UAS, afectando su rendimiento. Hackear directamente el dron podría permitir tomar su control y aterrizarlo en un lugar seguro.
 - *Spoofing:* permiten suplantar las señales de posicionamiento del UAS para hacer creer a la aeronave que se encuentra en una posición distinta a la real, ocasionando errores en la ejecución de los comandos programados por el operador. El spoofing se utiliza para desviar al dron de su trayectoria real.
 - *Jamming de RF:* un inhibidor envía una señal de

interferencia que anula e interrumpe el enlace de radiofrecuencia entre el UAS y su operador al generar grandes volúmenes de interferencia en la RF. Una vez que se corta el enlace RF, que puede incluir enlace wifi, el UAS generalmente descenderá al terreno o iniciará una maniobra de “regreso a casa”.

- *Jamming de GNSS:* interrumpe el enlace satelital que el UAS utiliza para la navegación como GPS o GLONASS. Los UAS que pierden su enlace satelital generalmente mantienen su posición actual, aterrizan o regresan al punto de control, lo cual facilita la identificación de la ubicación del operador.
- *Microondas de alta potencia:* dirige pulsos de energía de microondas de alta intensidad al UAS, deshabilitando los sistemas electrónicos de la aeronave. Esto puede causar una interrupción temporal o la destrucción física del UAS.

2.4. Restricción del uso de las tecnologías de neutralización en entornos urbanos

En el uso de las tecnologías de neutralización en un entorno urbano se debe tener en cuenta el comportamiento del dron. Este puede actuar de diferentes maneras según esté programado. Puede volver al lugar de donde despegó, quedarse en vuelo estático hasta que se agote la batería, ir descendiendo poco a poco o incluso comportarse de forma errática.

El derribo de un dron se debe llevar a cabo de manera controlada para que no provoque efectos colaterales indeseados al caer sobre personas, edificios o vehículos que se encuentran en los espacios comunes.

El empleo de las técnicas de neutralización (perturbación de las frecuencias de control y de las señales de navegación por satélite del dron e incluso el descenso forzado del dron de forma incontrolada), requiere de la pertinente evaluación de riesgos y debe responder a un principio de proporcionalidad entre la medida empleada y la peligrosidad de la amenaza.

Por tanto, la tendencia y el objetivo del uso de la tecnología anti-dron es poder interferir las comunicaciones entre el dron y su operador y tomar directamente el control de la aeronave.

2.5. Limitaciones técnicas de las tecnologías

Actualmente, no existe una solución única que sea 100% eficaz, siendo necesario combinar los distintos tipos de

tecnologías según el entorno en el que se pretenda desplegar el sistema anti-dron. Por otra parte, la tecnología que permite hackear la señal del dron y hacerse con el control de este se encuentra en una fase inicial de desarrollo, ya que por el momento solo ha probado ser eficaz cuando se trata de controlar drones de los cuales se conoce su protocolo³.

Además, independientemente de la tecnología disponible, los falsos positivos y negativos de estos sistemas son inversamente proporcionales a la eficacia del sistema.

Las principales limitaciones técnicas (ventajas e inconvenientes) de los sistemas C-UAS se muestran en la siguiente tabla:

Sistema	Distancia detección	Información aportada	Detectan enjambres	Evita obstáculos	Entorno urbano	No urbano	Calidad/precio
Tecnologías de detección en áreas urbanas (sensores):							
RF (pasivo)	Alta	Muy alta	SI	Medio	Bien	Muy Bien	Ajustado
	<p><i>Ofrecen una excelente capacidad de detección y clasificación/identificación.</i></p> <p><i>La detección de las radiofrecuencias (RF) de uso de los drones es la mejor opción en entornos no urbanos, pero depende de la frecuencia de transmisión (no se detectarán drones que no emitan RF). Por lo que su uso presenta limitaciones debido a la diversidad de bandas de frecuencia, por el uso de nuevas técnicas (5G) o bien por tratarse de drones que vuelan de forma autónoma sin dejar rastro de RF detectable, sin conexión con el operador y usando navegación autónoma (inercial o de reconocimiento del terreno).</i></p>						
Sonido (pasivo)	Escasa	Alta	Mal	Muy Bien	Regular	Bien	Alto
	<p><i>Los sistemas acústicos de detección funcionan bien a muy corta distancia, con un potencial de alcance de unos cientos de metros, pero la fiabilidad de la información recabada no es suficiente para conducir contramedidas de manera autónoma.</i></p> <p><i>Son muy vulnerables al ruido de ambiente por lo que su respuesta no es adecuada en un entorno urbano.</i></p>						
EO (pasivo)	Escasa Media	Alta	Mal	Mal	Regular	Bien	Medio
	<p><i>Los sistemas electro-ópticos dependen de la distancia focal, por lo que ofrecen buena capacidad de seguimiento y clasificación/identificación, pero tienen una capacidad de vigilancia muy limitada. No tienen una buena capacidad para detectar el dron.</i></p> <p><i>Sus alcances son relativamente cortos y se ven agravados por la meteorología adversa y la interferencia de diversos fenómenos ambientales.</i></p>						
Radar (activo)	Alta	Alta	SI	Regular	Mal	Muy Bien	Alto
	<p><i>El radar se centra en detectar y rastrear amenazas. Puede requerir un sensor secundario para la clasificación, identificación y evaluación de la amenaza (como cámaras). En escenarios complejos (con múltiples obstáculos), el rendimiento de detección puede verse degradado.</i></p> <p><i>La relación de alcance/coste de los sensores radar no es muy adecuada, ya que para duplicar el alcance se requiere incrementar la potencia por un factor de 16.</i></p>						

3. El protocolo es una forma de cifrado y compresión de datos.

Sistema	Distancia detección	Información aportada	Detectan enjambres	Evita obstáculos	Entorno urbano	No urbano	Calidad/ precio
Sistemas de Neutralización (efectores):							
Cinéticos	Escasa	Imprevisibles	No	No	Bajo	Bien	Medio Alto
	<i>Funcionan bien, pero a muy corta distancia.</i>						
Microondas	Media	Altos	Bajo	No	No	Bien	Alto
	<i>Es válido a muy corta distancia. Suelen ser exigentes en cuanto a tamaño, peso y potencia y pueden aumentar el riesgo de daño colateral propio.</i>						
Hacking	Media	Bajo	Medio	Medio	Bien	Bien	Altísimo
	<i>Dependerá de cada dron, por lo que es difícil de generalizar.</i>						
Spoofing	Media	Altos	Si	Medio	Bien	Muy Bien	-
	<i>Eficaces contra drones basados en navegación por satélite. Efectos colaterales por la interferencia de señal GPS. Los drones normalmente tienen un sistema de retorno automático cuando es interferida la señal GPS. No útiles contra drones que no utilizan la señal GPS.</i>						
Láser	Alta	Medios	No	No	Bajo	Bien	Altísimo
	<i>El láser está en fase experimental. Tienen ciertas limitaciones en condiciones meteorológicas adversas y presentan una rápida degradación de enfoque según se incrementa la distancia.</i>						
Jamming	Alta	Medios-Altos	Si	Bajo	Medio	Bien	Normal
	<i>El jamming depende de la frecuencia usada entre el transmisor y el receptor (TX-RX), por lo que es muy eficaz si se conoce la frecuencia. Son útiles contra enjambres de drones con la misma frecuencia. Son ineficaces si el dron es pasivo o no se conoce su frecuencia de uso. Efectos colaterales.</i>						

Ilustración 6. Comparativa de los distintos sistemas C-UAS

A las anteriores limitaciones, hay que añadir otros aspectos como son: el incremento de la velocidad y alcance de los drones LSS, las restricciones legales ante la inhibición de las RF, el uso de enjambres de drones, las operaciones de drones nocturnas y el uso por los drones de sistemas de detección de objetivos basados en inteligencia artificial que mejoran su precisión e independencia de operadores externos.

2.6. Uso de tecnología anti-dron

Las tecnologías de detección descritas en el ámbito civil tienen una amplia aplicación más allá de la detección de drones hostiles:

- **Seguridad Pública:** Las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad utilizan drones para vigilar eventos públicos, detectar actividades sospechosas y responder rápidamente a posibles incidentes.

- **Inspección de Infraestructuras:** Los drones equipados con cámaras térmicas y sensores pueden inspeccionar infraestructuras críticas detectando problemas antes de que se conviertan en fallos graves.
- **Gestión de Catástrofes:** En situaciones de emergencia, los drones pueden ser desplegados para evaluar daños, localizar víctimas y coordinar a las unidades de los servicios de emergencia y rescate.

El Estado tiene la competencia exclusiva en materia de Defensa y Seguridad Pública, y las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad tienen la misión de proteger el libre ejercicio de los derechos y libertades y garantizar la seguridad ciudadana. Por lo tanto, el Estado es responsable último de la protección de los ciudadanos y de las instalaciones, infraestructuras y demás elementos materiales de interés. El empleo de los sistemas C-UAS se rige por la pertinente legislación nacional o internacional.

La **Ley Orgánica 4/2015**, de 30 de marzo, de protección de la seguridad ciudadana, establece en su artículo cuarto los principios rectores de la acción de los poderes públicos en relación con la seguridad ciudadana y en concreto autoriza a las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad para intervenir ante la existencia de una amenaza específica o un comportamiento objetivamente peligroso que, razonablemente, sea susceptible de provocar un perjuicio real para la seguridad ciudadana y, en concreto, atentar contra los derechos y libertades individuales y colectivos o alterar el normal funcionamiento de las instituciones públicas.

Por tanto, con vistas al mantenimiento y en su caso restablecimiento de la seguridad ciudadana, estaría justificada la intervención de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad con sistemas C-UAS para destruir y/o neutralizar un dron ajeno no autorizado.

Los distintos organismos o entidades que necesiten sistemas C-UAS para mitigar la amenaza que supone un dron para sus instalaciones o personas deberán, o bien contratar los servicios de empresas de seguridad especializadas en el uso de drones, o, por el contrario, disponer de sus propios sistemas C-UAS. Las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad, responsables últimos de la seguridad, se encargarán de la vigilancia de aquellas zonas e infraestructuras sensibles o críticas que les sean asignadas, como aeropuertos y sus infraestructuras, centrales nucleares, principales ciudades, etc. En cualquiera de las opciones anteriores, los organismos deberán concretar con las autoridades competentes y las empresas de seguridad, los permisos, acuerdos y procedimientos operativos y de coordinación pertinentes para contar con servicios C-UAS en sus instalaciones.

Como ejemplo de coordinación entre organismos con responsabilidades C-UAS para contar con procedimientos de uso y coordinación de los medios C-UAS o el despliegue de sistemas anti-dron, en el entorno aeroportuario se aprobó el “Protocolo Nacional Coordinado de Respuesta a la Amenaza de Presencia de Drones en el Entorno Aeroportuario” que se está aplicando en los aeropuertos españoles y del que se incluyen más detalles en el siguiente apartado.

3. PROCEDIMIENTOS DE RESPUESTA EN LOS AEROPUERTOS

Los riesgos que plantean los UAS no cooperativos suponen una amenaza emergente contra la aviación civil, no considerada con anterioridad en los escenarios tradicionales en seguridad de la aviación (salvo en zonas de conflicto, donde los UAS llevan años suponiendo una amenaza real). Además, ninguna normativa de seguridad, nacional o europea, aborda directamente la forma de proceder cuando se producen incidentes con UAS.

Los estudios han demostrado que los drones comerciales comunes con gran capacidad de carga útil podrían causar daños a las aeronaves en caso de impacto y, en última instancia, requerir aterrizajes de emergencia.

A bajas velocidades la magnitud de los daños tras la colisión podría implicar deformaciones en el revestimiento de la aeronave y daños adicionales a las estructuras internas. A altas velocidades, las colisiones podrían provocar graves deformaciones en la curvatura de las lamina, daños en los bordes de ataque e incluso una posible penetración de restos del dron en la zona fracturada.

Aunque, la principal consecuencia de la presencia de drones no autorizados en los entornos aeroportuarios es la interrupción de las operaciones, causando desvíos de vuelos e incluso el cierre temporal de pistas.

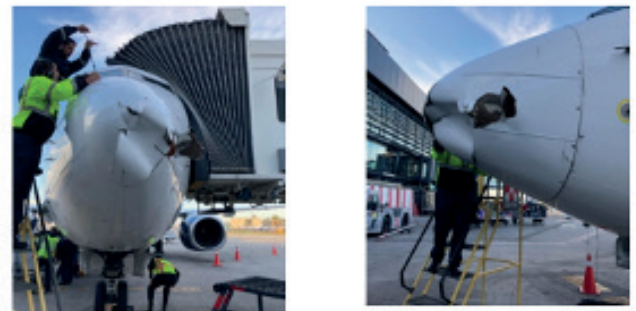


Ilustración 7. Consecuencias: impacto de un dron contra una aeronave

Ante las consecuencias de los incidentes con drones en los aeropuertos de Gatwick y Heathrow en diciembre de 2018, el Comité Nacional de Seguridad de la Aviación Civil⁴ aprobó una estrategia en junio de 2019, basada en un análisis de riesgos, que implicaba el desarrollo de un protocolo coordinado para el estudio de las tecnologías de sistemas anti-dron y su despliegue en los aeropuertos nacionales.

4. El Real Decreto 550/2006, de 5 de mayo, designa la Autoridad competente responsable de la coordinación y seguimiento del Programa Nacional de Seguridad para la Aviación Civil y determina la organización y funciones del Comité Nacional de Seguridad de la Aviación Civil.

3.1. Protocolo Coordinado de Respuesta

En la reunión del Comité Nacional de Seguridad de la Aviación Civil celebrada el 26 de junio de 2019, se aprobó dicho Protocolo de respuesta ante la amenaza de la presencia de drones en el entorno aeroportuario.

Durante 2019 se desarrollaron procedimientos locales en los aeropuertos de acuerdo con el citado documento.

En el caso del aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas, este procedimiento se ha activado varias veces, siendo el suceso más relevante el ocurrido el 3 de febrero de 2020, cuando se detectó el sobrevuelo de un dron errático a 800 m de altitud en un área del entorno aeroportuario definida como de riesgo alto. Este incidente supuso la interrupción de las operaciones durante 45 minutos, afectando a más de 200 vuelos y teniendo que desviar 26 de ellos a otros aeropuertos.

El protocolo proporciona indicaciones a los aeropuertos para responder ante la detección de un UAS en los alrededores de un aeródromo, describiendo los procesos de seguridad que se deben adoptar en el ámbito aeroportuario y de navegación aérea. El protocolo da respuesta a dos posibles tipos de amenaza:

- Uso mal intencionado de un UAS en el entorno aeroportuario con la intención de cometer un acto de interferencia ilícita contra la aviación civil.
- Intrusión involuntaria o voluntaria de un UAS en espacio aéreo no autorizado que puede causar interrupción de las operaciones aeroportuarias.

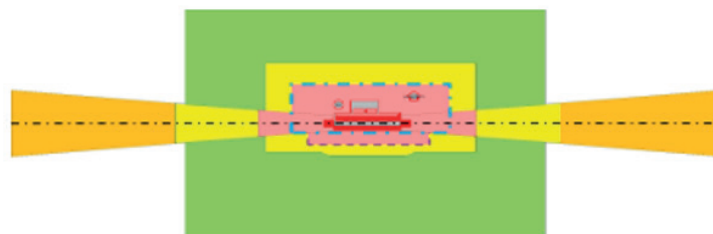
El protocolo se ha planificado en dos fases:

- Fase 1: actuaciones utilizando sólo medidas preventivas y organizativas; y
- Fase 2: establecimiento del procedimiento de respuesta cuando se dispone de medios tecnológicos de detección y/o neutralización.

La disposición identifica los criterios a aplicar y las actuaciones a seguir, e incluye las medidas de contingencia que aseguran la adecuada respuesta, coordinación y criterio para la toma de decisiones entre las entidades y organizaciones involucradas en la respuesta: el gestor aeroportuario, el proveedor de servicios de navegación aérea, las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad, el Ministerio de Defensa (en el caso de los aeródromos de utilización conjunta), las compañías aéreas y otras entidades.

Incluye:

- **Medidas a nivel local**, que se focalizan en la prevención (carteles prohibiendo el uso de drones en las proximidades de los aeropuertos, avisos, acuerdos con ayuntamientos próximos...) con la finalidad de concienciar a la población, además de actuaciones de supervisión y control por parte de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad.
- **Requisitos de formación**, dirigidos al personal cualificado del entorno aeroportuario para detectar y evaluar la amenaza (cómo se detecta, a quién se comunica, cuándo se considera que la presencia del dron constituye realmente una amenaza, etc).
- **Canal de comunicación** desde el centro de canalización de la amenaza a los pilotos y a las dependencias de navegación aérea para proporcionar información del comportamiento del UAS.
- **Procedimiento de evaluación de la amenaza** según las notificaciones de los avistamientos recibidos. Los procedimientos de detección se basan en la identificación de estas aeronaves por observadores, “cualificados” (controladores, pilotos, etc) o “no cualificados” (ciudadanos en general).
- **Medidas organizativas de comunicación y coordinación** entre las unidades de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad para la identificación del piloto.
- **Medidas del Control de Tráfico Aéreo (ATC) de carácter técnico – operativo**. Dentro del entorno aeroportuario se definen unas áreas (área de vigilancia del dron, área de protección security dron, área del recinto aeroportuario, área de protección pista dron y área de protección operación) y se realiza el análisis de riesgos asociado a la amenaza que supone la presencia de drones en dichas zonas.
Se han definido zonas de riesgo para cada uno de los aeropuertos, clasificándolas como: bajo, medio y alto. El resultado es la definición de las actuaciones técnico-operativas ATC que se adoptarán en función del área en la que se ha localizado un dron. Una vez confirmada la amenaza se activan las medidas ATC asociadas con la posición notificada del dron.
- **Criterios de cancelación de los procedimientos de contingencia** adoptados y recuperación de las operaciones.



NIVEL RIESGO	Medidas ATC de carácter técnico – operativo
BAJO	<ul style="list-style-type: none"> • Informar de la presencia del dron a los pilotos vía ATIS o radiofrecuencia, según corresponda. • El proveedor de servicios de navegación aérea del aeropuerto debe analizar si es posible aplicar medidas adicionales para evitar el encuentro entre el dron y las demás aeronaves.
MEDIO*	Suspender: <ul style="list-style-type: none"> • La utilización del circuito de aeródromo afectado. • Los aterrizajes sólo en la pista afectada, si el dron se encuentra en la zona de frustrada se considera que los aterrizajes también estarán afectados. • Despegues sólo en la pista afectada.
MEDIO	
ALTO	El nivel de riesgo requiere suspender cualquier maniobra de despegue y/o aterrizaje en el aeropuerto, pudiendo requerirse igualmente la suspensión de operaciones en el área de maniobras. No obstante, se deberá tener en cuenta el número de pistas y la posibilidad de aplicar las restricciones anteriores solo a la/s pista/s afectadas.

* En las superficies limitadoras de obstáculos de despegue y aproximación a menos de 3 km del umbral o el extremo de la pista

Ilustración 8. Zonas de riesgo y medidas ATC de carácter técnico – operativo

3.2. Análisis de riesgos en el entorno aeroportuario

En el caso de los aeropuertos, en el análisis de riesgos se han considerado los siguientes tipos de escenarios de amenazas:

a) Escenarios de motivación maliciosa:

- Ataque a una aeronave en vuelo (UAS con o sin carga explosiva – en los tramos intermedios y final de la aproximación, aterrizaje y despegue).
- Ataque a una aeronave en tierra (UAS con o sin carga explosiva en zona de estacionamiento).
- Ataque a instalaciones aeroportuarias (UAS con o sin carga explosiva contra instalaciones de combustible y torre ATC).
- Interrupción operativa significativa en el aeropuerto (UAS con o sin carga explosiva cuando vuela en las proximidades del aeropuerto/dentro del perímetro del aeropuerto).

b) Uso no malicioso de UAS, escenarios de uso negligente:

- Impacto negligente del UAS sobre una aeronave durante la aproximación, aterrizaje o despegue.
- Importante interrupción operativa debido a la presencia de UAS negligentes en el aeropuerto.

A nivel nacional, las medidas de mitigación consideradas hasta el momento no han incluido tecnologías y sistemas capaces de detectar e identificar UAS y/o neutralizarlos. Sin embargo, en base a la revisión del análisis de riesgos relacionado con esta amenaza, el **Comité Nacional de Seguridad** aprobó el 21 de julio de 2022 una **Hoja de Ruta** para evaluar la tecnología disponible en el mercado para la detección y neutralización de drones y su impacto e interferencia en los sistemas de navegación aérea y en otros equipos aeroportuarios. Por lo que, en la Fase 2 se está integrando, inicialmente, el sistema SIGLO-CD (Sistema Global Contra Drones), sin neutralización, del Ministerio del Interior en el procedimiento local del aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas.

3.3. Despliegue de tecnología C-UAS

Las tecnologías y sistemas C-UAS ya se han utilizado para la protección de diferentes infraestructuras y escenarios críticos en todo el mundo. Sin embargo, el despliegue de sistemas C-UAS para su uso en un entorno aeronáutico requiere de análisis y consideraciones con respecto a la compatibilidad con los equipos y sistemas de comunicación y navegación terrestres y embarcados y la posible interrupción de las operaciones de las aeronaves.

Para un despliegue de estos sistemas con las necesarias garantías de seguridad operativa, en la Hoja de Ruta se han identificado una serie de hitos:

- Desarrollos normativos (respaldo normativo para asegurar el despliegue de sistemas de detección y neutralización en los aeropuertos y decisión sobre quién puede operar los sistemas anti-dron en un entorno aeroportuario y qué entidad es responsable de su uso y activación en tiempo real).
- Selección de sistemas (evaluación técnica e identificación de los criterios, factores y parámetros para la selección de la tecnología);
- Adquisición y despliegue de los sistemas (especificaciones técnicas para seleccionar el sistema con los distintos proveedores, identificación de las pruebas/test necesarios a realizar para evaluar el riesgo de interferencia con los sistemas de navegación, dependencias ATC colaterales, equipos de a bordo y la operativa aeroportuaria, y estudios de impacto compatibilidad e interferencia con los sistemas del aeropuerto, con los sistemas CNS -Comunicación, Navegación y Vigilancia- de la aeronave, con las servidumbres aeronáuticas);
- Autorizaciones y aprobaciones preceptivas (identificación de trámites en los diferentes marcos regulatorios: homologación y certificación de los productos, permisos de frecuencias de uso, autorizaciones de servidumbres y aprobaciones de estudios aeronáuticos preceptivos);
- Puesta en marcha del sistema anti-dron (identificación de pruebas de puesta en marcha, pruebas en fábrica, pruebas en emplazamiento, verificación de los sistemas, configuración y adaptación al entorno y pruebas de integración con otros sistemas).

3.4. Planificación y desarrollo de pruebas/ tests para la evaluación de sistemas C-UAS en aeropuertos

En el año 2020 se llevaron a cabo pruebas de las tecnologías de sistemas anti-dron en el aeropuerto de Asturias, mientras

se mantenía la operatividad normal del aeropuerto. Bajo la coordinación de la Secretaría de Estado de Seguridad, participaron AENA, AESA, DGAC, ENAIRE, Policía Nacional, Guardia Civil y el Ejército del Aire y del Espacio, además de 16 empresas, tanto españolas como extranjeras (Alemania, Reino Unido, China, Francia, Israel), para probar las posibles interferencias de estas tecnologías con los sistemas de navegación aérea y del aeropuerto y analizar su potencial. Para la detección, se probaron y analizaron las tecnologías basadas en radar o emisiones de radio frecuencia y para la neutralización en hacking y jamming. No se detectaron eventos significativos, más allá de alguna interferencia en la banda del radar de superficie y los sistemas de neutralización con los sistemas GNSS de a bordo.

Debido a los continuos avances en las tecnologías C-UAS, es esencial planificar y realizar pruebas operativas reales para evaluar el nivel de madurez y las capacidades crecientes de los diferentes sistemas.

Cuando se trata de probar algunas capacidades de C-UAS en el ámbito de la aviación civil, existen desafíos y también limitaciones que deben tenerse en cuenta, entre las que se destacan:

- Pueden existir restricciones legales con respecto a la inhibición de RF.
- En el caso de las tecnologías de detección RF, las limitaciones de capacidades pueden venir del rango de frecuencia que pueden utilizar los operadores de UAS o por el uso de nuevas técnicas (5G) o porque vuelen de manera autónoma.
- En el caso de las tecnologías C-UAS radar, acústica y térmica, la reducida firma que dejan los UAS también es una limitación.
- Los UAS LSS son difíciles de identificar y neutralizar.
- Las tecnologías jamming o spoofing de los C-UAS pueden alterar la señal del GPS y, por tanto, tener consecuencias no deseadas en la aviación civil.
- En el caso de la tecnología de neutralización de C-UAS, siempre puede causar riesgos no deseados y colaterales si el UAS interceptado no aterriza de manera segura y controlada.

Además, en el caso de pruebas de C-UAS realizadas en un entorno de aviación civil comercial, se debe evaluar cuidadosamente la posible interferencia de los sistemas C-UAS con otros sistemas aeronáuticos. A continuación, se muestran algunos resultados obtenidos en las pruebas reales realizadas:

- Sistemas de detección C-UAS probados:
 - Posible interferencia en la banda S del PSR (Primary Surveillance Radar).
 - En aquellos sistemas C-UAS que operan en banda X, posible interferencia en el SMR (Surface Movement Radar).
- Sistemas C-UAS que utilizan inhibición y jamming de RF:
 - Posible interferencia en la banda L1 del GPS.
 - Interferencia con sistemas de sincronización/ datación y equipos de vigilancia: PSR, MSSR (Monopulse Secondary Surveillance Radar), MSSR-S (Monopulse Secondary Surveillance Radar), WAM (Wide Area Multilateration), SMR, ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast).
 - Interferencia en la localización del dron: ADS-B.
- Sistemas C-UAS que utilizan tecnología spoofing:
 - Interferencia en la banda S del PSR.

4. SOLUCIONES TECNOLÓGICAS

Si bien existen diversas soluciones comerciales, no hay ningún enfoque normalizado para evaluar, probar y comparar la tecnología, por lo que a los organismos o entidades policiales les resulta difícil escoger la más conveniente para cada una de las situaciones a las que se enfrentan en su labor diaria.

La idea general es que no hay una solución única que sea 100 % eficaz. Es necesario combinar la tecnología según el entorno en el que se despliegue el sistema.

Detectar es diferente a rastrear, que a su vez es muy distinto de identificar y luego interceptar o neutralizar. El requisito mínimo es, al menos, disponer de dos sensores que se combinen para proporcionar detección mediante identificación. Sin embargo, el componente más importante de cualquier sistema es la capa de software de comando y control que aprovecha lo mejor de todos los sensores para brindar una información analizada e integrada.

En los actuales sistemas de detección, se utilizan como sensores primarios el radar y los sensores de radiofrecuencia, siendo los sensores electro-ópticos y de infrarrojos sensores secundarios.

La tecnología que permite hackear la señal del dron y hacerse con el control de éste se encuentra en una fase inicial de desarrollo, por lo que sólo es eficaz cuando se trata de drones cuyo protocolo es conocido.

La tendencia es incorporar inteligencia artificial que mejore la capacidad de respuesta a las amenazas, mediante modelos de “machine learning” y gestión automatizada de la información, de cara a potenciarla. No sólo se detecta el dron, sino que se analiza su comportamiento. El sistema es capaz de registrar rápidamente las diferentes amenazas comprendiendo su movimiento, tipo de frecuencia, trayectoria y sus “intenciones”.

En el siguiente gráfico se muestran las tecnologías de neutralización más empleadas actualmente.

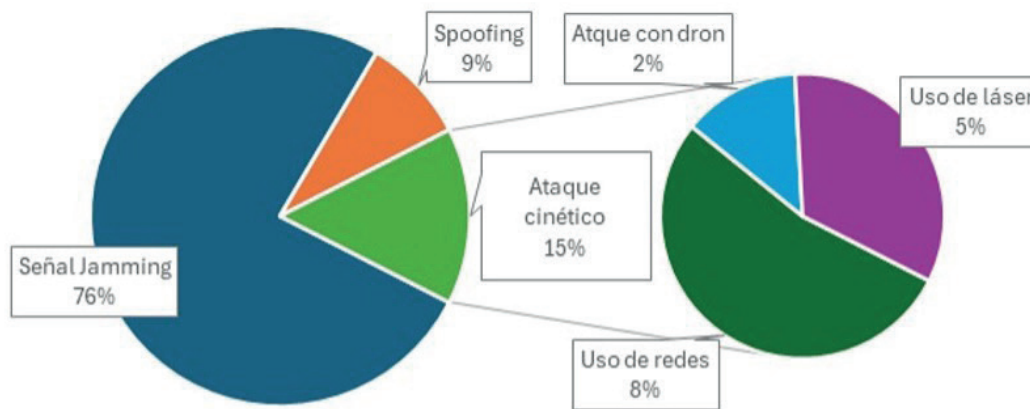


Ilustración 9. Tecnología C-UAS utilizada para neutralización

La solución es integrar todas las tecnologías en un sistema en el que esté centralizada toda la información bajo una única herramienta de mando y control. Este concepto permitirá la integración de varias fuentes y los sensores más avanzados del mercado en una misma solución, en función de las necesidades y nivel de protección requerido.

4.1 Proyectos y tecnología de aplicación nacionales

El Sistema Global Contra Drones (SIGLO-CD) ha sido desarrollado por la Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicación de la Secretaría de Estado de Seguridad. En cuanto a la tecnología utilizada, el SIGLO-CD está basado en la detección y perturbación (jamming) de señales de RF y GPS. En el desarrollo del SIGLO-CD participa Telefónica junto con la compañía ASDT.

La red SIGLO-CD se compone de un conjunto de sistemas C-UAS, sedes departamentales y locales. Cada una de ellas dispone de consolas para la detección y seguimiento de amenazas, unidades detectoras e inhibidores RF. Asimismo, cuenta con servidores centrales, una base de datos central y una aplicación web. Todo el sistema se gestiona desde una plataforma web centralizada, accesible desde Internet.

Prestaciones de sistema SIGLO-CD:	
Tiempo de respuesta para la detección	≤ 120 seg.
Alcance de detección	≈ 5 km
Precisión en la localización	hasta 5 metros
Neutralización	manual
Enjambre de drones	Contra enjambre de unos 3 drones
Seguimiento en tiempo real	≥ 100 drones

En la Fase 2 de su despliegue incrementará el número de sensores para conseguir mayor cobertura y, una mejor precisión y efectividad del sistema. Se dotará con sistemas anti-dron fijos a 32 ciudades de todo el país, además de la adquisición de otras 86 unidades portátiles.

El personal encargado de la monitorización de una infraestructura, área o evento puede crear zonas restringidas personalizadas en las que se generará una alarma si las antenas/sensores detectan la presencia de un UAS en ellas. El protocolo que se inicia variará considerablemente y puede ir desde simplemente acercarse a sancionar al piloto hasta interceptar la aeronave. En el caso de la neutralización, se llevará a cabo empleando los sistemas integrados en las

antenas fijas o con el empleo de sistemas portátiles. La principal diferencia es que los sistemas móviles cuentan con un menor rango de acción, pero a cambio ganan en flexibilidad en el despliegue.

En cuanto a los desarrollos tecnológicos de empresas españolas, varias empresas están activamente involucradas en el desarrollo de sistemas antidrones de alta tecnología. La mayoría de ellas se centran en la detección de drones por radiofrecuencia o radar. En el Anexo a este documento se incluye un listado no exhaustivo de las principales empresas nacionales y el alcance de sus desarrollos.

5. DESARROLLOS TECNOLÓGICOS DE EMPRESAS ESPAÑOLAS

A continuación, se muestran a modo de ejemplo empresas que han contribuido a los desarrollos de tecnologías en materias de sistemas anti-dron a nivel nacional (no es un listado exhaustivo debido a la continua evolución tecnológica de este sector).

La empresa ETRAIR, del grupo ETRA, ha desarrollado un sistema anti-dron portátil para detectar e, incluso, neutralizar drones no autorizados (Kondor). El sistema detector cuenta con tecnología avanzada de detección 360° de drones comerciales, con rangos desde 1 kilómetro de radio. Además, emite una interferencia de señales para neutralizar todo tipo de drones, pudiendo elegir entre varias frecuencias personalizables.

La empresa ATL Europa ofrece soluciones para la inhibición de drones en una determinada área con sistemas de radiofrecuencia y microondas. Sus equipos van desde pequeños sistemas compactos y transportables para la protección personal, hasta potentes sistemas instalables en infraestructuras críticas o bases militares.

Aeronáutica SDLE, ha suministrado sistemas anti-dron portátiles al Ejército de Tierra y a la Guardia Civil. Sus equipos se utilizan para bloquear y neutralizar drones en diversas operaciones.

La empresa System Drone España (SDE) ha desarrollado un sistema de equipos fijos que cubren la seguridad aérea de grandes ciudades como Barcelona (Proyecto Kuppel). El hardware está compuesto por equipos modulares y escalables de fácil instalación, que, en combinación con un software propio, detecta las señales de RF emitidas tanto por el dron como por el piloto del mismo, así como las emisiones

de video que se capturan desde el dron. El software determina qué tipo de dron es el que está operando en el rango de espacio seleccionado previamente en el sistema informático.

Una vez captado qué tipo de dron se aproxima y lo identifica, y dependiendo de las instrucciones, pasará a ser un dron amigo o será clasificado como amenaza, haciendo un seguimiento del mismo vía posicionamiento y de forma visual, mediante las cámaras PTZ (cámara que puede moverse en 3 ejes.).

INDRA participa en el desarrollo del sistema Crow, que es un sistema anti-dron utilizado por el Ejército del Aire y del Espacio. El Crow tiene por objetivo detectar, rastrear, identificar y neutralizar cualquier amenaza generada por un dispositivo UAS. Todas las tecnologías utilizadas, incluidas la detección radar, análisis RF, detección de dirección de radio, detección, análisis y clasificación electro-óptica, interferencia RF o interferencia de señal GNSS están integrados en un único puesto de operación.

El sistema es capaz de detectar, utilizando radares de alta resolución, UAS de pequeño tamaño a muy largas distancias. Una vez detectada la amenaza, emplea un sistema oprónico para determinar si ese dron supone una amenaza y, en el caso de serlo, detectar su localización exacta. Una vez la amenaza ha sido confirmada y localizada, el modelo empleará un sistema de interferencias que interrumpirá el guiado del UAS. Para proteger superficies de mayor tamaño, pueden programarse varios Crow para trabajar en conjunto.

La empresa ADST ha desarrollado el SENDESCOPE, sistema portátil de detección de drones, que proporciona una detección omnidireccional con un alcance de hasta 5 km, en condiciones óptimas. Este sistema detecta y geoposiciona la gran mayoría de drones comerciales y sus tecnologías de control. Es un sistema portátil que se integra en una maleta, facilitando su transporte y despliegue. Además, puede operar de manera independiente permitiendo la visualización de drones en una tablet que lleva incorporada.

En cuanto a la detección por radar, ART ha desarrollado un sistema de detección de drones (Midrange 3D) capaz de detectar UAS de muy pequeño tamaño a kilómetros de distancia proporcionando la altura del vuelo. Se trata de un radar que cuenta con una antena multihaz 3D y una etapa adicional de alta potencia que hace posible la detección y seguimiento de UAS de muy pequeño tamaño a una distancia de hasta 3 km. y una altura de 1.000 m. Además, el sistema se puede complementar con plataformas electroópticas,

sensores de radiofrecuencia, dispositivos de contramedidas y el software de mando y control para obtener una solución integrada.

El sistema C-UAS Cervus III adquirido por el Ejército de Tierra está diseñado para detectar e interceptar aeronaves no tripuladas de pequeño tamaño que operan a baja altura y velocidad, basado en la colaboración entre el Ejército y la empresa privada. Este sistema, desarrollado íntegramente en España, es fruto de la colaboración entre las empresas TRC, Escribano Mechanical & Engineering y ART, todas ellas empresas españolas.

El Cervus III utiliza inteligencia artificial y aprendizaje automático para mejorar la precisión en la detección y neutralización de drones enemigos. Este sistema incorpora capacidades de procesamiento integradas en las cámaras Oteos de Escribano capaces de detectar objetivos a distancias de hasta 20 kilómetros. También dispone de un radar con un rango de detección con un alcance de hasta 10 kilómetros.

Una de las principales innovaciones es la incorporación de algoritmos de Inteligencia Artificial que permiten la detección y clasificación automática de drones sin la necesidad de una supervisión constante del operador. Esto reduce la carga de trabajo del personal y aumenta la velocidad de respuesta.

El sistema utiliza diferentes tipos de sensores, como radares y sistemas electroópticos, para detectar drones en su área de cobertura. Estos sensores pueden operar tanto en el rango visual como en el infrarrojo, permitiendo una detección precisa durante el día y la noche. Una vez detectado un dron, el sistema trabaja para identificarlo, diferenciándolo de otros objetos en el espacio aéreo, como aves o aviones. Después de la detección e identificación, el sistema sigue el dron, calculando su trayectoria y prediciendo su posible comportamiento para tomar medidas adecuadas. Por último, emplea contramedidas para neutralizar la amenaza del dron. Estas contramedidas pueden incluir interferencias en la comunicación entre el dron y su controlador, la perturbación de su navegación, o en algunos casos, la capacidad de derribarlo de manera controlada y segura.

El sistema está diseñado para integrarse con otros sistemas de defensa para proporcionar una respuesta coordinada y efectiva contra drones hostiles.

La iniciativa JEY-CUAS de la UE, en la que participan las empresas Escribano e Indra, se centra en el desarrollo del Sistema Europeo Conjunto para Contrarrestar los Sistemas Aéreos No Tripulados (JEY-CUAS). Este proyecto busca

crear un sistema modular y flexible para la neutralización de drones, adaptable a diversas situaciones y necesidades. Los métodos de neutralización incluyen las opciones de softkill y hardkill, ofreciendo una solución integral contra diferentes tipos de drones y amenazas aéreas.

En el marco del Proyecto Courageous, financiado por la Unión Europea, se elabora una metodología normalizada que permita probar y seleccionar los sistemas C-UAS que se pueden utilizar para detectar y rastrear los drones que penetran en un espacio aéreo protegido o en una zona de exclusión de vuelo.

Este método se basará en una serie de escenarios habituales que recogen una amplia gama de lugares y situaciones; por ejemplo, la seguridad en prisiones, aeropuertos, infraestructuras esenciales y fronteras, o la lucha contra el tráfico de drogas y la trata de personas.

A partir de los resultados de dichos ejercicios, se elaborará un método completo para la realización de pruebas que permita comparar cualitativa y cuantitativamente, y con objetividad, los distintos sistemas anti-dron.

A corto plazo, dicho método normalizado permitirá que las FFCCS que integran la red de organismos encargados de la aplicación de la ley de la Unión Europea, y en general las de todo el mundo a través de INTERPOL, posean una mejor comprensión de las capacidades necesarias para combatir el uso ilegal de estos aparatos.

A medio y largo plazo, se probará una serie más amplia de sistemas comerciales anti-dron mediante el método del proyecto Courageous, lo cual también permitirá a los diseñadores de tales sistemas actuar sobre los diseños a partir de datos cuantitativos.

CONCLUSIONES

Las nuevas amenazas originadas por el uso intencionado de un dron con fines terroristas o delictivos, o por la operación negligente de un dron en zonas no autorizadas para el vuelo (ya sea por error o desconocimiento de las normas), requieren ser abordadas.

Los sistemas C-UAS se han convertido en la solución necesaria para responder al problema de seguridad y privacidad derivado del incremento de los UAS, la mejora de sus características técnicas y su fácil accesibilidad al público en general. Estos sistemas son capaces de detectar e impedir que los drones invadan determinadas zonas del espacio aéreo donde no están autorizados, evitando así la comisión de actividades delictivas, terroristas, amenazas a eventos multitudinarios o interferencia en instalaciones sensibles como los aeropuertos, entre otras.

Los sistemas de detección y/o neutralización de drones están basados en el uso combinado de diferentes tecnologías ya existentes. En concreto, los sistemas de neutralización persiguen interferir en las comunicaciones entre el dron y el operador/estación de tierra, con el fin de tomar el control del dron y evitar el uso malintencionado o negligente del mismo.

La industria española ha demostrado capacidades significativas en el desarrollo de tecnologías anti-dron, pero aún se enfrenta a varios retos:

- Las amenazas protagonizadas por los drones evolucionan rápidamente, por lo que los sistemas deben ser flexibles y adaptarse a diferentes escenarios; y
- La solución para responder a la amenaza requiere la integración eficaz de distintas tecnologías e incluso de diferentes fabricantes.

Además, las Autoridades deben fomentar la colaboración internacional en proyectos europeos y con organismos internacionales para desarrollar soluciones tecnológicas más avanzadas e identificar soluciones regulatorias para establecer una metodología de certificación común de los sistemas anti-drones para su adquisición por las entidades en el ámbito civil.

Por último, las autoridades españolas con competencias en el ámbito de la aviación civil han aprobado un Protocolo de actuación en el entorno aeroportuario para responder de forma coordinada ante la presencia de drones no cooperativos en las inmediaciones de los aeropuertos. El Protocolo persigue mitigar, en lo posible, las consecuencias indeseables de este tipo de eventos, principalmente los problemas de seguridad para las aeronaves en vuelo, cancelando las operaciones temporalmente, una vez que la amenaza se confirma y persiste.

REFERENCIAS

1. C-UAS desde la perspectiva civil Francisco Bringas Ruíz Comandante del Ejército del Aire Centro de Guerra Aérea.
2. DRONES Y SEGURIDAD NACIONAL Un estudio multidimensional Consejo Nacional de Seguridad Aeroespacial julio 2022.
3. Revista de AERONAUTICA Y ASTRONAUTICA. Nº 911, abril 2021. Ministerio de Defensa.
4. DRONE INCIDENT MANAGEMENT AT AERODROMES PART 1: The challenge of unauthorised drones in the surroundings of aerodrome. EASA.
5. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Towards a European strategy for the development of civil applications of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Brussels, 4.9.2012 SWD(2012) 259 final.
6. Grupo de Trabajo del Comité Nacional de Seguridad de la aviación civil para el seguimiento e implantación de la hoja de ruta para el despliegue de sistemas anti-drones en aeropuertos nacionales. AESA.
7. Publicaciones y presentaciones de la Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad (SGSCS) del Ministerio del Interior.



Dron DJI Matrice 200 series [Fuente:<https://www.dronenerds.com>].



Primer vuelo de un Aerotaxi eléctrico en la ciudad de Nueva York, día 12 de noviembre de 2023 [Fuente: <https://www.jobyaviation.com>].

Movilidad Aérea Urbana (UAM)

María Anta García
Esther Nistal Cabañas
Olga C. Aranda García
Raúl García González
Carolina Goy Naranjo
Enrique Contreras Alonso
César Ruiz Hurtado
Carlos Hugo Prieto Pedrosa

CAPÍTULO 5

Este capítulo aborda la Movilidad Aérea Urbana (UAM), destacando su potencial para transformar el transporte en áreas urbanas mediante el uso de aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL), resultando una solución innovadora para reducir la congestión del tráfico terrestre y minimizar el impacto medioambiental. Se describe el concepto de operación y los diferentes enfoques a nivel europeo e internacional, se incide en la necesidad de integrar desde el principio estos servicios aéreos en los planes de movilidad urbana sostenible, y se mencionan los desafíos regulatorios y tecnológicos que deben superarse para una efectiva implementación.

Además, se enumeran las diferentes configuraciones de aeronaves VTOL, sus ventajas y desventajas, y la importancia de los vertipuertos como infraestructuras necesarias para facilitar la operación, y más concretamente el despegue y aterrizaje de estas aeronaves. También se tratan las principales aplicaciones de la UAM, incluyendo aerotaxis y servicios de paquetería, y se destaca la importancia de la aceptación social y la colaboración entre autoridades locales y organismos internacionales para el éxito de la UAM. En resumen, la UAM promete revolucionar el transporte urbano, pero requiere un enfoque coordinado y regulado para alcanzar su pleno potencial.



1. CONCEPTO DE OPERACIÓN DE LA UAM

1.1. Introducción

Antes de adentrarnos en la UAM, conviene definir el concepto y el origen del interés de la Unión Europea por la “**Movilidad Urbana**” [1]. Se entiende por este término la facilidad con la que las personas y las mercancías pueden desplazarse entre destinos en ciudades o zonas urbanas gracias a la red de transporte y a los servicios disponibles. Gestionarla de forma eficiente afronta numerosos desafíos, siendo uno de los más difíciles la congestión del tráfico. El transporte por carretera es una de las principales causas de contaminación del aire de las ciudades siendo perjudicial para la salud de los ciudadanos, sin olvidar la contaminación acústica que produce.

En 2021 se publica el **Nuevo Marco de Movilidad Urbana de la UE** [2] que determina que la movilidad es un aspecto crítico de la inclusión social y un factor determinante del bienestar humano, considerando el transporte como un servicio esencial en el pilar europeo de derechos sociales.

Además, la forma de contribuir de manera eficiente a la consecución de los objetivos climáticos es pasar de un enfoque basado en los flujos de tráfico a un enfoque basado en el desplazamiento más sostenible de las personas y las mercancías. Un claro ejemplo de eficiencia y sostenibilidad lo constituye la proliferación de vehículos eléctricos, así como de bicicletas y patinetes, tanto particulares como de uso compartido.

Es en este contexto en el que, aprovechando el desarrollo de la tecnología de los UAS (eminentemente eléctricos), propiciada por los avances de la transformación digital [3], y de las aeronaves de despegue vertical (VTOL), surge el concepto de “**Movilidad Aérea Urbana**” (UAM “**Urban Air Mobility**”).

La rápida evolución de este tipo de tecnologías ha dado como resultado un mercado inundado de diseños, prototipos y nuevos conceptos de aeronaves. Los vehículos pensados para prestar servicios en el marco de la UAM pueden ser de diferentes tamaños, desde pequeñas aeronaves para transporte de objetos poco voluminosos hasta aeronaves con capacidad de transportar un número reducido de pasajeros; y pueden tener una variedad de configuraciones de diseño, incluyendo rotores múltiples, alas fijas o abatibles, y sistemas de propulsión eléctrica o híbrida.

Estas aeronaves tienen, teóricamente, menores costes de explotación y una funcionalidad altamente automatizada, lo que permite introducir nuevos tipos de operaciones aprovechando la gran versatilidad del medio aéreo que, a priori, carece de las restricciones físicas de las vías terrestres.

El concepto de UAM, mencionado en el **Nuevo Marco de Movilidad Urbana de la UE** se refiere a un conjunto de reglas, procedimientos y tecnologías, que hacen posible el transporte aéreo de personas y mercancías dentro de las ciudades y sus alrededores. Para maximizar su potencial de contribución a la movilidad urbana, resulta necesario integrar estos servicios aéreos en el marco del plan de movilidad urbana sostenible de nuestras ciudades desde el principio.

Para explotar el medio aéreo con fines de movilidad urbana habrá que desarrollar y tener en consideración los siguientes aspectos:

- Desarrollo de aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) capaces de transportar pasajeros de manera más eficiente que los medios tradicionales (aerotaxis frente a taxis convencionales).
- Estudio y desarrollo de escenarios con gran número de UAS de pequeño tamaño entregando paquetes de forma rápida e individualizada por toda la ciudad.
- Entregas de paquetería en lugares muy diversos. Desde núcleos superpoblados hasta lugares donde los medios de transporte tradicionales no llegan o no son viables (ciudades de montaña, núcleos de población mal comunicados o separados por grandes cantidades de agua).
- Diseño de infraestructuras innovadoras, como los vertipuertos, para facilitar las operaciones de despegue y aterrizaje de estas aeronaves.
- Definición y desarrollo de nuevos servicios que prestar a los operadores de la UAM. Serán necesariamente digitales, con alto grado de automatización y con mínima interacción del factor humano en comparación con la aviación convencional.
- Nuevas formas de organización del espacio aéreo para acomodar un número creciente de UAS y VTOL, que compartirán espacio con aeronaves tradicionales.
- Una discusión honesta sobre el papel del factor humano.

En definitiva, se mejorará la eficiencia, en tiempo y en recursos económicos, evitando los atascos del tráfico terrestre, ya sea para el transporte de pasajeros como de mercancías (entre el centro logístico y el usuario final, o entre centros logísticos). Se persigue la reducción de la huella ecológica gracias al desarrollo y empleo de las plataformas eléctricas.

Por todo ello, la UAM tiene el potencial de revolucionar las redes de transporte urbano y desempeñar un papel esencial en las futuras ciudades inteligentes. El término “urbano” en este contexto, refiere no solo a las ciudades, sino también a sus áreas de influencia¹.

Cuando esté completamente implantada, la UAM permitirá a miles de personas utilizar servicios autónomos o semiautónomos de movilidad aérea integrados en el día a día de las principales ciudades, de forma similar a como hoy se coge un autobús, se pide un taxi o se encarga una pizza que se entrega en motocicleta.

1.2. Visiones de la UAM

En realidad, el concepto UAM estaría comprendido dentro de otros conceptos más amplios, según la bibliografía que se consulte, como son la “**Movilidad Aérea Avanzada**” (**AAM “Advanced Air Mobility”**) de acuerdo con la visión de la FAA (Federal Aviation Administration) estadounidense y de la OACI, o la “**Movilidad Aérea Innovadora**” (**IAM “Innovative Air Mobility”**) concebida en el ámbito europeo por EASA. A continuación, se introducen y explican ambos conceptos.

FAA

El 23 de marzo de 2020, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) en su publicación **One Word Change Expands NASA's Vision for Future Airspace Mobility** [4] anuncia una visión más integradora del futuro de los viajes aéreos, y comienza a usar la terminología AAM [5] para reflejar esa concepción innovadora. Así, la AAM pasa a englobar el concepto UAM que llevan varios años apoyando e investigando. Desde ese momento se suceden las publicaciones y las actualizaciones del concepto UAM y su relación con la AAM:

- En junio de 2020 la FAA publica el primer **Concepto de Operaciones de Movilidad Aérea Urbana (UAM)** [6]. La UAM sigue considerándose un subconjunto

de la AAM para transportar pasajeros y carga de manera local, regional, inter-regional y urbana usando vehículos revolucionarios. Básicamente la idea primigenia es usar corredores (flexibles y a demanda) para separar estos tráficos del resto de operaciones. Fuera de estos corredores, aplican las reglas ATM convencionales. La tecnología y arquitectura de los servicios UAM debe ser flexible y escalable. El nivel de automatización de los vehículos y las operaciones es solo incipiente.

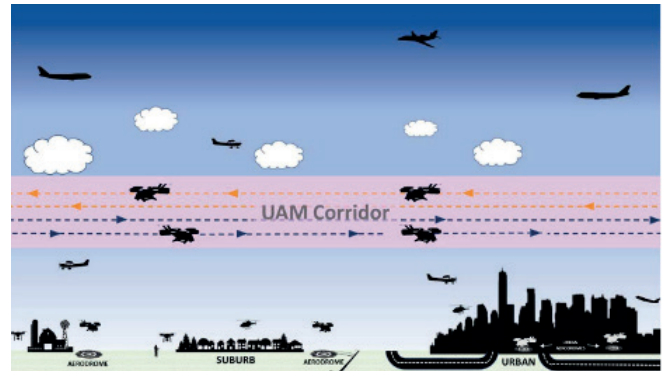


Ilustración 1. Concepto de Corredores para uso por la UAM [Fuente: FAA].

- En octubre de 2022 se regula y define mejor el concepto de AAM gracias a la **Ley Federal de Coordinación y Liderazgo de la AAM** [7]. Se entiende por AAM “un sistema de transporte que traslada personas y bienes por vía aérea entre dos puntos de EEUU utilizando aeronaves con tecnologías avanzadas, incluidas aeronaves eléctricas, o aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL), tanto en espacio aéreo controlado como no controlado”.
- Se crea un Grupo de Trabajo cuyo propósito es madurar el concepto de AAM. El grupo de trabajo busca: generar nuevas opciones de transporte y ampliar las actividades y las oportunidades de negocio, avanzar en la sostenibilidad medioambiental y en el uso de nuevas tecnologías y preparar a los EEUU para competir en un mercado global.
- El 3 de mayo de 2023, la FAA publica la versión 2.0 del **Concepto de Operaciones (ConOps) de Movilidad Aérea Urbana (UAM)** [8], que refleja los progresos en la UAM como elemento fundamental de la AAM, incorporando resultados de las investigaciones realizadas y las aportaciones del resto de partes de la administración y de la industria.

1. No existe una definición específica, pero podría entenderse como el área metropolitana que rodea a las grandes ciudades, o las zonas residenciales alejadas de los centros urbanos en ciudades más pequeñas.

- Mientras que la AAM apoya una amplia gama de operaciones de pasajeros, carga y de otro tipo dentro y entre entornos urbanos y rurales, la UAM se centra en las operaciones de vuelo dentro y alrededor de las zonas urbanas. La visión UAM se apoya en la introducción de un entorno operativo cooperativo conocido como Gestión de Tráfico Extensible (xTM), que complementa la prestación tradicional de Servicios de Tráfico Aéreo (ATS) para futuras operaciones/vuelos de pasajeros o de transporte de carga.



Ilustración 2. Relación entre conceptos AAM, UAM, UTM, ATM, xTM. [Fuente: FAA].

- El documento recoge una serie de necesidades inherentes a la UAM:
 - Existencia de corredores exclusivos de espacio aéreo.
 - Seguimiento de unas reglas específicas que la FAA vaya definiendo en cada momento.
 - Obligación de los operadores de planificar sus operaciones, de compartir información con las Autoridades y otros operadores UAM en la zona, y de disponer de la infraestructura y equipamiento identificados por la FAA.
 - Disponer de piloto a bordo, hasta que se pueda alcanzar la madurez suficiente para que se pilote remotamente.
 - La existencia de vertipuertos.
- En julio de 2023, la FAA publica el **“Plan de Implantación de la AAM”** [9]. Dicho plan documenta el trabajo necesario para permitir las operaciones iniciales de AAM en una variedad de entornos operativos o «sitios clave» a corto plazo. El Plan incorpora la iniciativa **“Innovate28 (I28)”** Esta iniciativa aprovechará las asociaciones público-privadas para identificar las ubicaciones clave y los casos de uso de interés para las partes interesadas de la industria AAM.

En resumen, para la FAA la AAM [10] no es una tecnología única, sino un conjunto de tecnologías nuevas y emergentes aplicadas al sistema de transporte aéreo, especialmente en nuevos tipos de aeronaves. Los casos teóricos de uso de la AAM incluyen la UAM, la RAM (Regional Air Mobility), los servicios públicos, la entrega de grandes cargas y los vehículos privados o recreativos. Además, precisa que la UAM y la RAM son subconjuntos de actividades de AAM que tienen lugar en entornos urbanos.

OACI

- A escala mundial, la **OACI** en su 41ª Asamblea, celebrada en septiembre de 2022, reconoció la necesidad de un marco armonizado, y de disposiciones y orientaciones globales sobre la AAM. Por ello creó un grupo de expertos (AAM SG) para desarrollar una visión y un marco holísticos, así como para que dicho grupo proporcione asesoramiento sobre las actividades en este ámbito.
 - En septiembre de 2024 celebró su primer **Simposio AAM 2024**, con el lema «Armonización e interoperabilidad mundial de la AAM: Retos y oportunidades». Reconoce que la AAM representa la próxima frontera de la aviación. Impulsada por tecnologías innovadoras de aeronaves y propulsión, digitalización y mayor automatización, la citada AAM está dando lugar a una nueva escala de operaciones e introduciendo nuevos servicios y modos de movilidad. Por ello, como resultado del simposio, OACI ha instado a las partes interesadas a colaborar en su desarrollo para:
 - Comprender qué es la AAM.
 - Construir la infraestructura necesaria (física y digital) para que pueda desarrollarse plenamente.
 - Regular la AAM.
- La OACI cree firmemente que, una vez que la AAM esté completamente desplegada, va a aportar beneficios fundamentales para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas:
- Crecimiento económico.
 - Propulsión sostenible a través del uso de fuentes de energía limpias.
 - Mayor conectividad y mejora de los enlaces de transporte existentes.
 - Equidad e inclusión permitiendo que los modos de transporte sean más accesibles para todos.

- Salvar vidas, mediante el transporte urgente de suministros médicos y el propio transporte de pacientes.

Pero a la vez reconoce que queda mucho camino por andar y varios retos que abordar:

- Desarrollo de regulación que garantice la interoperabilidad, la eficiencia y fomente la escalabilidad.
- Integración del espacio aéreo para que pueda acomodar todos los tipos de aeronaves y operaciones con garantías.
- Coordinación entre administraciones e intercambio de información entre todas las partes interesadas.
- Fomento de las ideas pioneras. Financiación pública para apoyar a los emprendedores.

EASA

En el ámbito europeo, en el Capítulo 3 ya se introdujo el **marco regulador desarrollado por EASA** desde que en 2018² asumiera la competencia sobre todos los UAS, independientemente de su peso. Estos **reglamentos**³ establecidos por EASA han propiciado el desarrollo del mercado de forma armonizada en toda la UE. Aun así, era necesario reforzar la estrategia para desarrollar un ecosistema próspero de drones viable a nivel europeo.

- En septiembre de 2021 se creó el **Grupo de Líderes de Drones** con el objeto de proporcionar una orientación de alto nivel al desarrollo de una nueva estrategia y formular recomendaciones para su redacción a la Comisión Europea. Sus trabajos se plasmaron en un Informe [11], publicado en abril de 2022. En opinión del Grupo, los aerotaxis servidos mediante aeronaves eVTOL y los UAS más pequeños utilizados para operaciones de entrega de carga constituyen el núcleo de la Movilidad Aérea Innovadora (IAM “Innovative Air Mobility”).

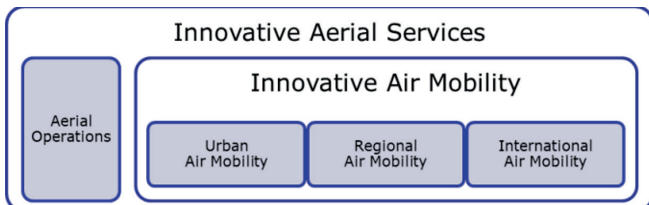


Ilustración 3 Primeras nociones de las relaciones entre conceptos IAM-UAM-IAS [Fuente: Comisión Europea].

Aunque se espera que las primeras operaciones de aerotaxi se lleven a cabo con aeronaves tripuladas

con capacidad eVTOL, es probable que en el futuro dichas operaciones se realicen con plataformas similares, pero pilotadas a distancia y, posteriormente, totalmente autónomas. Por lo tanto, es necesario apoyar la fase de transición y garantizar una integración sin problemas de estos nuevos conceptos operativos en el ámbito de la aviación actual, así como en el futuro sistema de transporte multimodal.

Para hacer frente a estos retos y facilitar el desarrollo de la IAM, el Grupo presenta varias recomendaciones:

- Comunicar mejor las oportunidades que ofrece la IAM.
- Aprender de otros modos de movilidad, de sus ventajas e inconvenientes, de su percepción por el público (bicis y patinetes eléctricos).
- Explorar los problemas de ruido e impacto visual.
- Conseguir que sea asequible a todos los públicos y no elitista.
- Diseñar las ciudades para acomodarla desde el principio, pero también aprovechar la multimodalidad e interacción con otros modos de transporte.

Seguidamente, después de la publicación del Informe del Grupo de Líderes de Drones, se publicó la Estrategia de Drones 2.0 [12]. Abarca 10 ámbitos que deberían impulsar el desarrollo del ecosistema de los drones y contribuir a la consecución de esta visión y establece **19 acciones emblemáticas** que permitirán contribuir a lograr los objetivos planteados y estructura el mercado de servicios de drones civiles en tres segmentos.

- El primero correspondería al concepto de **“Servicios Aéreos Innovadores”** (IAS “Innovative Aerial Services”). Debido a la falta de una definición y en consonancia con el enfoque reglamentario centrado

2. Hasta ese momento se habían celebrado diversas Conferencias de alto nivel sobre los drones en Riga (2015), Varsovia (2016), Helsinki (2017) y Amsterdam (2018).

3. **Reglamento Delegado (UE) 2019/945** sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas. **Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947** relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas.

Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 sobre un marco regulador para el U-Space; **Reglamento de Ejecución (UE) 2021/665** por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2017/373 en lo que respecta a los requisitos para los proveedores de servicios de gestión del tránsito aéreo/navegación aérea y otras funciones de la red de gestión del tránsito aéreo en el espacio aéreo U-Space designado en el espacio aéreo controlado.

Reglamento de Ejecución (UE) 2021/666 por el que se modifica el Reglamento (UE) 923/2012 en lo que se refiere a los requisitos para la aviación tripulada que opera en el espacio aéreo U-Space.

en las operaciones, EASA los clasifica como el conjunto de operaciones o servicios posibilitados por las nuevas tecnologías de transporte aéreo: incluyen tanto el transporte de pasajeros o de carga como las operaciones aéreas (por ejemplo, vigilancia, inspecciones, cartografía, etc).

Como segundo segmento considera la IAM, definida como la movilidad aérea segura y sostenible de pasajeros y mercancías mediante tecnologías de nueva generación integradas en un sistema de transporte multimodal. Se compone de la UAM, la “Movilidad Aérea Regional” (RAM “Regional Air Mobility”), los servicios de emergencia médica y los vuelos turísticos.

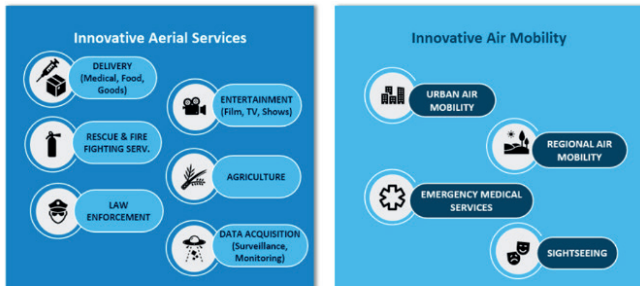


Ilustración 4 Innovative Air Mobility and Services [Fuente: EASA].

El tercer segmento corresponde al **U-space** que se trató en el Capítulo 3.

La UAM, tal y como la define EASA, es un nuevo sistema de transporte aéreo de pasajeros y carga en entornos densamente poblados y edificados, y en sus alrededores, posible gracias a aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL y UAS eléctricos) equipadas con nuevas tecnologías, como tecnologías mejoradas de baterías y propulsión eléctrica. Estas aeronaves llevarán un piloto a bordo o serán pilotadas a distancia. Con todo esto, EASA ha comenzado a crear el marco regulador, teniendo en cuenta los resultados de su encuesta de aceptación social realizada en 2021 [13].

En abril de 2024, EASA publica un **paquete de reglamentos** [14][15][16][17][18] para hacer frente a los retos de seguridad específicos de los nuevos conceptos y servicios ya mencionados garantizando que sus operaciones sean tan seguras como las de la aviación tripulada. Se centra en dos ámbitos emergentes: las VTOL y las operaciones de UAS en **la categoría específica**. Se introducen nuevos requisitos y procedimientos de certificación de la aeronavegabilidad para los VTOL tripulados y no tripulados, abordando tanto la integridad física como los riesgos de seguridad digital que podrían afectar a su funcionamiento seguro. También incluyen requisitos para la licencia de piloto de aerotaxi, normas sobre integración en el espacio aéreo (definición de trayectorias de vuelo, normas de despegue y aterrizaje, etc.), y normas específicas que permitan a estas aeronaves realizar servicios médicos de urgencia y operaciones de rescate. Serán de aplicación a partir del 1 de mayo de 2025.

- El 4 de septiembre de 2024 EASA publica la **NPA 2024-06** [19]⁴ que permitirá desarrollar medios de cumplimiento alternativo y material guía que facilitará la implantación del paquete de reglamentos mencionado.
- Asimismo, para dar cumplimiento a la **acción emblemática número 7**⁵ de la Estrategia sobre Drones 2.0, en diciembre de 2023 lanza la plataforma Innovative Air Mobility Hub [20], para la **Movilidad Aérea y de Drones sostenible en Europa**. El objetivo es reunir a todos los actores del sistema europeo, incluidas las ciudades, las regiones, las autoridades nacionales, la UE, los operadores y los fabricantes y así facilitar la aplicación segura, eficiente y sostenible de las prácticas de IAM.

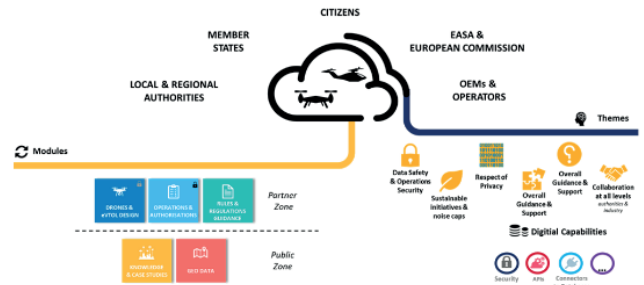


Ilustración 5. Innovative Air Mobility Hub [Fuente: EASA][20].

EASA también ha creado un equipo de trabajo específico, compuesto por participantes clave de todos los rincones del ecosistema IAM europeo. Estas partes interesadas representan una amplia gama de conocimientos, lo que garantiza una cobertura completa del panorama IAM en Europa. Está organizado en torno a ciudades y regiones e incluye también a operadores, fabricantes⁶ y autoridades aeronáuticas nacionales:

4. Instrumento de consulta normativa de EASA. El término responde a Notices of Proposed Amendment mediante las que EASA consulta su material reglamentario preliminar para recopilar opiniones de las partes interesadas para su consideración antes de emitir sus Opiniones y Decisiones.
 5. Acción emblemática 7: La Comisión financiará la creación de una plataforma en línea para apoyar una aplicación sostenible de la movilidad aérea innovadora por parte de las autoridades, las comunidades, los municipios, la industria y las partes interesadas.
 6. Lillium, empresa que desarrolla aerotaxis, forma parte del grupo pero según las últimas noticias solicita la insolvencia de sus dos filiales Lillium GmbH y Lillium eAircraft GmbH al no conseguir ayudas estatales del gobierno alemán para obtener la financiación necesaria para mantenerlas a flote (25/10/2024).

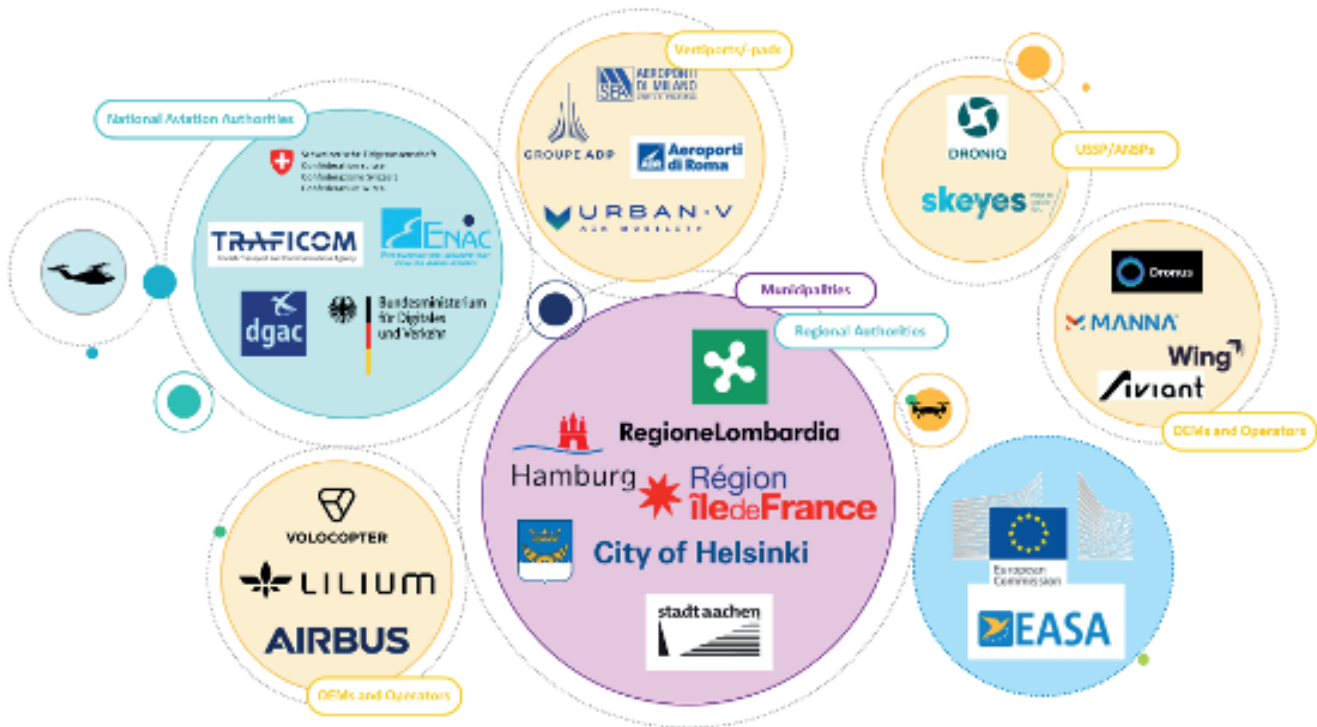


Ilustración 6 Innovative Air Mobility Task force [Fuente: EASA [21]].

Resumiendo los conceptos que hemos introducido en este apartado, la AAM se centra más en el desarrollo y la adopción de las nuevas tecnologías de aeronaves eléctricas e híbridas en operaciones para el transporte de personas y bienes. Por su parte, la IAM persigue un ecosistema de transporte urbano holístico y ofrece un enfoque transformador, prometiendo respuestas de emergencia más rápidas y una reducción de la congestión urbana. Sin embargo, su éxito depende de que se integre cuidadosamente en los marcos de transporte existentes, se aborden las repercusiones medioambientales y se mantenga un diálogo permanente con el público, así como una estrecha relación con las autoridades nacionales de aviación, para garantizar una integración segura en el ecosistema de la aviación en general.

1.3. Características de la operación UAM

Consideraciones del entorno urbano para tener en cuenta en las operaciones UAM

En el entorno urbano se prevén operaciones crecientes de paquetería, fotografía, filmografía, vigilancia, inspección, transporte de pasajeros y mercancías, todas ellas servidas por aeronaves VTOL y UAS.

De todas las operaciones anteriores, la UAM abordará

estrictamente las aplicaciones de movilidad de personas y mercancías, favorecidas o impulsadas por la posibilidad de despegue y aterrizaje verticales, gracias al empleo de motores eléctricos, que han dejado de ser una promesa para pasar a ser una realidad económicamente viable.

En este escenario, los edificios presentan obstáculos físicos a la operación, a la vez que dificultan las prestaciones de los servicios de comunicación, navegación y seguimiento de las aeronaves. Por ejemplo, impiden disponer del número óptimo de satélites en línea de vista para la navegación. A su vez, pueden inducir efectos atmosféricos adversos especialmente para los UAS de pequeño tamaño, como las ráfagas de viento, las turbulencias, la cizalladura, etc⁷. Finalmente, la naturaleza de las ciudades también aporta un elemento que puede dificultar las operaciones: la no aceptación de las personas que viven o trabajan en ellas a convivir con estas aeronaves por las afecciones de ruido, contaminación visual, o la falta de privacidad que pudiera conllevar la existencia de las aeronaves que dan servicio a las operaciones UAM en el día a día.

⁷ Estos efectos se incluyeron en las simulaciones realizadas en el desarrollo del proyecto USEPE, proyecto cofinanciado por la UE en el marco del Programa de Investigación e Innovación H2020, a través de la empresa común SESAR, que fue coordinado por Isdefe.

Y para permitir su operación en origen y destino, se diseñan modelos de nuevas infraestructuras: los **vertipuertos**, que actúan como terminales de vuelo similares a los aeropuertos, pero ubicados en la ciudad o en puntos estratégicos, constituyendo los nodos de una red de transporte conectados entre sí mediante corredores. Estos podrían ubicarse en edificios, como ya es el caso de algunos helipuertos, o diseñarse por completo como nuevas infraestructuras dedicadas a la operación de UAS y VTOL, como se verá en el apartado 4 de este capítulo.

Las operaciones de aeronaves de UAM en el entorno urbano, en contraposición con otras operaciones de UAS en espacios aéreos más amplios y sin la limitación de obstáculos físicos, tienen su mayor desafío en la densidad de operaciones. ¿Cómo hacer para absorber toda la demanda potencial en un entorno limitado (en superficie y altura), y a la vez garantizar unos niveles de seguridad adecuados entre ellos, y entre UAS/VTOL y la aviación convencional que también necesite usar el espacio urbano?

Como ya se introdujo en el Capítulo 3, existen muchos proyectos de investigación que se mueven entre los dos extremos: libertad absoluta de operación para los UAS y VTOL, o, en contraposición, el establecimiento de corredores, tubos y capas de espacio aéreo que no solo limitan espacialmente a estas aeronaves, sino que también los organizan por características y actuaciones (velocidad, maniobrabilidad, equipamiento mínimo).

Una estructura particular de espacio aéreo que posibilitará la UAM son los denominados **corredores**. Se componen de un volumen de espacio aéreo que define una ruta tridimensional, posiblemente dividida en múltiples segmentos, con requisitos de prestaciones asociadas (p.e. precisión de navegación). Facilitan una vía ágil y segura al tráfico entre nodos representativos. Por ejemplo, un corredor puede definirse para enlazar un centro logístico con un centro de distribución dentro de la ciudad, y pueden iniciarse o finalizar en infraestructuras intermodales de transporte para facilitar la salida o entrada a la misma.

Aunque su uso para aeronaves de la UAM puede aumentar la seguridad al segregarlas del resto de tráfico, manteniéndolas convenientemente separadas entre sí dentro del corredor, este método puede ocasionar problemas de eficiencia y capacidad. Para paliar estas dificultades, han surgido iniciativas relativas a la organización del espacio aéreo, tales

como estructurar el mismo en diferentes niveles o capas, según los requisitos específicos de rendimiento de los UAS. Ejemplos de estas iniciativas los constituyen el proyecto **AMU-LED** [22] del programa SESAR y las propuestas de la FAA, que forman parte del concepto xTM, mencionado en el apartado 1.

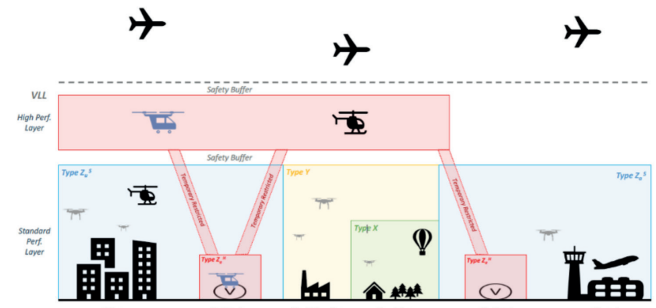


Ilustración 7 Estructura de Espacio Aéreo AMU-LED
[Fuente: AMU-LED – High Level ConOps – Initial].

Convivencia entre aeronaves de UAM y aeronaves convencionales

En un escenario complejo de alta densidad de tráfico, generalmente a muy baja altitud (VLL) por debajo de los 500 ft (150 m. aproximadamente), y mientras no se disponga de sistemas DAA (Detect and Avoid) autónomos y suficientemente fiables (introducidos en el Capítulo 1), el seguimiento y el control de las operaciones UAM se hace inviable con métodos de control de tráfico tradicionales. Para dar respuesta a esa necesidad, nacen nuevas formas de gestión del espacio aéreo y del tráfico de las aeronaves UAM, como son el U-Space en Europa o el UTM en EEUU, que se introdujeron en el Capítulo 3. Ambos conceptos establecen un espacio dedicado, con reglas y servicios específicos, diseñado en principio para satisfacer las necesidades de las operaciones UAM, dejando abierta la posibilidad de uso por aeronaves convencionales. Es innegable que los vehículos tripulados de los servicios de policía, hospitales o emergencias (generalmente helicópteros) tendrán que estar facultados para seguir operando sin restricciones en estos espacios.

A nivel europeo, desde 2017 la **Empresa Común SESAR JU**⁸ comenzó a coordinar las actividades de investigación y desarrollo relacionadas con la integración del U-Space. Desde entonces, han surgido diversas iniciativas, entre otras, la del proyecto **SESAR PJ34 AURA** [24]. En él se estudiaba la interacción entre U-Space y el espacio aéreo controlado, y proponía la aplicación de la Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo (DAR) como solución al uso compartido del U-Space.

⁸ Es una asociación institucional público-privada europea, creada para acelerar a través de la investigación y la innovación la transformación del cielo único europeo (cielo europeo digital).

Tal y como define el **Reglamento de Ejecución 2021/664** [25] la DAR “consiste en la modificación temporal del espacio aéreo U-Space para adaptarse a los cambios a corto plazo en la demanda de tráfico tripulado, ajustando los límites geográficos de dicho espacio U-Space”. Se pueden dar dos situaciones

Si en el espacio U-Space se proporcionan servicios de control de tránsito aéreo a las aeronaves tripuladas, los controladores aéreos [26] segregarán el tráfico tripulado del no tripulado mediante la aplicación de la DAR, modificando temporalmente los límites laterales y verticales del espacio aéreo U-Space (parte derecha del siguiente gráfico).

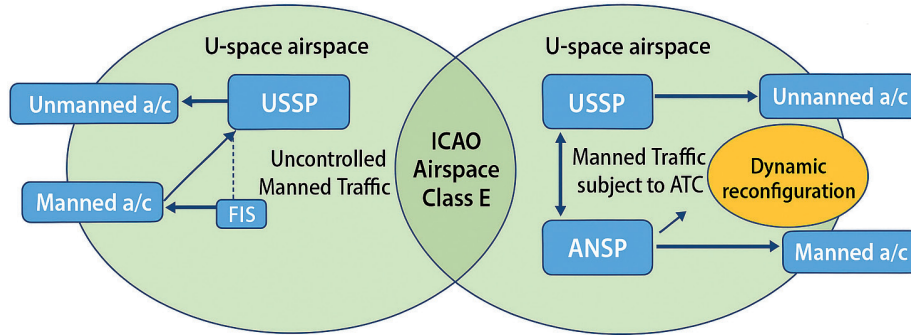


Ilustración 8 Reconfiguración Dinámica [Fuente: EASA].

Por otro lado, si las aeronaves tripuladas operan en un espacio aéreo U-Space, y no están sujetas a un servicio de control de tráfico aéreo, para garantizar la seguridad de las operaciones, de acuerdo con las Reglas del Aire europeas (SERA.6005), deberán ser perceptibles electrónicamente (**iconspicuity**¹⁰) de forma continua. Esto implica que las aeronaves deben estar adecuadamente equipadas para transmitir información que permita determinar su ubicación y poder realizar su seguimiento y monitorización. De esta forma, se asegura la coordinación adecuada entre ambos tipos de aeronaves.

Aspectos meteorológicos

Un factor extremadamente sensible para las aeronaves UAM es el **meteorológico**, dado que puede afectarles en mayor medida que a sus hermanos mayores, aviones o helicópteros. Aunque la propia aeronave puede evaluar el viento existente para ajustar su vuelo, o incluso si este es excesivo, evitar el despegue o forzar el aterrizaje, es necesario que los servicios de información meteorológica tengan una mayor sensibilidad y les aporten soluciones para supervisar los microclimas y situaciones meteorológicas adversas particulares de las ciudades. Una tormenta o la propia geografía urbana pueden dar pie a la aparición de fuertes corrientes de aire localizada,s que podrían provocar situaciones de alto riesgo para la evolución de estas aeronaves.

Proveedores CISP (Servicios de Información Común) y proveedores USSP (Servicios de U-Space) y servicios asociados como facilitadores de la UAM

La gestión del tráfico de UAS requiere de un altísimo grado de **automatización** y colaboración. La automatización no sólo es aplicable al propio control de la aeronave, sino también a la gestión del tráfico. La imagen de una persona gestionando el elevado volumen de aeronaves esperado, del mismo modo que realiza un controlador de tráfico aéreo actualmente, se antoja inverosímil con la tecnología actual.

Es en este contexto en el que EASA introduce los nuevos conceptos de proveedores CISP y USSP [25], ya definidos en el Capítulo 3. Los proveedores USSP proporcionarán servicios para facilitar un acceso protegido, eficiente y seguro al espacio aéreo U-Space para un gran número de UAS. Por su parte, el proveedor CISP será el encargado de la difusión de datos estáticos y dinámicos que permiten la prestación de servicios de U-Space.

Este alto grado de automatización supone un reto. La complejidad se hace mayor al considerar la participación de diferentes y múltiples agentes (proveedores CISP, proveedores USSP, proveedores de tráfico aéreo, operadores, usuarios, entes y organismos oficiales). Sus interrelaciones exigen un espacio colaborativo y altamente automatizado, con un intercambio de gran cantidad de información, tanto en la fase de planificación como de ejecución. Para optimizar la ruta y evitar conflictos, ésta debe planificarse conociendo la demanda de uso del espacio con todas las rutas ya

10. Una «capacidad en vuelo» para transmitir la posición y/o recibir, procesar y mostrar información sobre otras aeronaves, el espacio aéreo o la meteorología en tiempo real con el objetivo de mejorar el conocimiento de la situación por parte de los pilotos.

planificadas en 4D. La ejecución del vuelo debe ajustarse a la planificación, pero debe existir capacidad de respuesta ante los imprevistos que puedan surgir en la operación.

Aspectos de ordenación del territorio a nivel local

Los proyectos de investigación e innovación sobre UAM: **AIRMOUR** [27], **AURORA** [28] y **Flying Forward 2020** [29], financiados por la CE, han presentado **10 recomendaciones conjuntas** [30] después de tres años de colaboración entre 34 organizaciones de varios países europeos. Estas recomendaciones incluyen **involucrar a las autoridades locales** desde las etapas tempranas de planificación urbana, utilizar **Indicadores de Movilidad Sostenible (SMI)** para monitorizar el impacto de la UAM, aumentar la **conciencia y preparación para la UAM** mediante pruebas reales que permitan a los ciudadanos y funcionarios municipales comprender y comprometerse con los servicios UAM, y crear **redes de puntos de aterrizaje UAM** (vertipuertos). Además, destacan la importancia de expandir los marcos regulatorios para apoyar el vuelo autónomo y la implementación de **conectividad digital** a todas las aeronaves operando a baja altitud.

En resumen, todos los elementos señalados en relación con la UAM (estructuras de espacio aéreo, procedimientos de operación, procesos de intercambio de información, servicios asociados, ordenación del territorio...) no persiguen otra cosa que aumentar la eficiencia operativa del modo de transporte aéreo, mejorar la vida de los ciudadanos ofreciéndoles un nuevo modo de transporte y minimizar el impacto de estas operaciones en el transporte aéreo actual.

1.4. Iniciativas nacionales de elementos facilitadores de la UAM

En España se están llevando a cabo una serie de proyectos e iniciativas público-privadas, encaminadas al desarrollo e implementación de la UAM, principalmente valiéndose del U-Space como facilitador de este concepto. Se destacan las siguientes:

- **Plan de Acción Nacional de Despliegue de U-Space (PANDU) v2** [31]: plan estratégico, promovido por el Gobierno de España, que busca integrar las aeronaves UAS en el espacio aéreo de manera coordinada y eficiente a nivel nacional. Incluye la designación de los espacios aéreos U-Space y el desarrollo de infraestructuras y tecnologías necesarias para la gestión de tráfico UAS¹¹.

- **Portal para la Coordinación del U-Space en España** [32]: Iniciativa para garantizar la coordinación requerida por la normativa aplicable entre todas las partes interesadas.
- **Desarrollo de la plataforma U-Hub**: La plataforma U-Hub desarrollada por ENAIRE es necesaria para la prestación de servicios U-Space, y permitirá el intercambio de información entre los diferentes actores del U-Space, como por ejemplo, la comunicación entre CISP-USSP o USSP-USSP..
- **U-ELCOME**: proyecto europeo diseñado para implementar y validar los primeros servicios de U-Space dentro de zonas urbanas densamente pobladas. Las ciudades de Benidorm y A Coruña están siendo algunos de los escenarios elegidos para la realización de pruebas relacionadas con esta iniciativa. También en la ciudad de Zaragoza se realizaron diversas pruebas en las que se consiguió integrar con éxito tres proveedores de servicios U-space en una misma operación, utilizando la plataforma U-Hub de Enaire.
- La industria española participa en otros proyectos europeos dentro del ámbito U-Space y UAM como son: OPERA [33], EUREKA [34], SPATIO [35] y BUBBLES [36].

Junto a estas iniciativas, surgen otras a nivel más local o regional, lideradas por las propias ciudades interesadas en la implantación de esta innovadora forma de movilidad. Este es el caso, por ejemplo, de la Comisión de Movilidad Aérea Urbana del Ayuntamiento de Madrid [37], creada en septiembre de 2023, que entre otras cuestiones trabaja en el desarrollo de la primera Ordenanza Municipal que regule la UAM.

En los siguientes apartados se profundizará con más detalle en los desafíos y problemáticas identificadas, así como en los aspectos relacionados con las aeronaves que operarán en entornos UAM, los vertipuertos y sus aplicaciones específicas.

2. APLICACIONES (AEROTAXIS Y SERVICIOS DE PAQUETERÍA)

Existen diversos estudios de previsión referentes al mercado y nicho de negocio de la UAM y sus aplicaciones comerciales. Las estimaciones de EASA sitúan los potenciales usuarios de los servicios de la UAM que se exploran en esta sección en unos 340 millones para 2030, basándose en las previsiones de habitantes en las grandes

11. El PANDU no se refiere explícitamente a las aeronaves VTOL, tan solo a los UAS. Las aeronaves VTOL en principio irán pilotadas a bordo. Sin embargo, la tendencia será progresar hacia el concepto de VTOL pilotadas remotamente, incluso automáticas

ciudades europeas para esa fecha. Estima que el tamaño del mercado de UAM en Europa, incluyendo la investigación y desarrollo, la fabricación de vehículos, las operaciones y la construcción de infraestructuras, será de aproximadamente 4.200 millones de euros en 2030, lo cual podría generar o mantener aproximadamente 90.000 empleos.



Ilustración 9 Impacto de la UAM en Europa “Fuente: EASA”.

Un estudio de la NASA [38] de finales de 2018 estima que en 2030 exista un mercado estable para servicio de entrega de última milla, así como nichos de mercado concretos para el desarrollo comercial de aerotaxis, siempre refiriéndose a las grandes urbes como núcleo de estas actividades.

Estudios más recientes, como el realizado por KPMG [39] en 2022, prevé un mercado objetivo a nivel mundial de 120.000 millones de dólares anuales a partir de 2040, comenzando por el sector de los viajes corporativos y traslados a aeropuertos, y extendiéndose a un uso más generalizado a medida que disminuyan los costes.

Como ya se ha apuntado en los apartados precedentes, además de los problemas más obvios como la viabilidad económica, tecnológica o normativa, las aplicaciones de la UAM se enfrentan al problema de la aceptación pública. A este respecto, diversos estudios muestran preocupación sobre el impacto de la UAM en la fauna, el ruido urbano o la calidad de vida; sin embargo, todos concluyen que el principal problema dentro de este ámbito se refiere a la seguridad o, más concretamente, a la percepción de la seguridad por parte de la ciudadanía. Estos mismos estudios indican que los ciudadanos sí parecen confiar en los niveles actuales de seguridad de la aviación y se sentirían tranquilos con la aplicación de estos niveles a la UAM.

No obstante, el Estudio [13] llevado a cabo en 2021 por parte de la EASA sobre la **aceptación social de la UAM en Europa** muestra resultados prometedores para el futuro de este innovador medio de transporte. Alrededor del 83% de los ciudadanos europeos encuestados expresaron una actitud positiva hacia la UAM, con un 64% interesados en el uso de servicios de entrega por drones y un 49% en utilizar

aerotaxis. Más del 70% de los encuestados consideran que la UAM puede ofrecer tiempos de respuesta mejorados en emergencias y reducir significativamente los atascos de tráfico en las ciudades.

El siguiente aspecto que cabe tratar son los servicios que puede aportar para convertirse en una solución integral, avanzada y eficiente de transporte en entornos urbanos.

2.1. Aerotaxis

El **aerotaxi** es el concepto utilizado para referirse a un servicio de transporte aéreo que utiliza aeronaves VTOL para transportar pasajeros de un lugar a otro. Este servicio proporciona un transporte rápido y eficiente en entornos urbanos, evitando el tráfico terrestre y reduciendo los tiempos de viaje. Los aerotaxis pueden ser operados por pilotos a bordo o de forma remota, o incluso realizar vuelos de forma autónoma; es decir, siguiendo una trayectoria preestablecida, sin la necesidad de una persona al mando.

El servicio de aerotaxi ofrece múltiples beneficios que pueden mejorar significativamente la eficiencia y la comodidad del transporte. Uno de los principales beneficios es el ahorro de tiempo para los pasajeros, ya que estos vehículos pueden volar directamente al destino deseado, evitando el tráfico y las rutas indirectas, lo que resulta en viajes mucho más rápidos. Por ejemplo, en los **traslados desde y hacia el aeropuerto**, facilitando los desplazamientos de los viajeros. Además, contribuyen a la reducción de atascos de tráfico rodado, ayudando a aliviar la congestión en las ciudades. A su vez, la industria de los aerotaxis no solo fomenta la innovación tecnológica, sino que también impulsa la creación de nuevos empleos, incluyendo pilotos, técnicos y diferentes perfiles relacionados con el control del tráfico aéreo.

Por otra parte, los desafíos a los que se enfrenta el servicio de aerotaxi son variados y complejos. La aceptación pública es una barrera significativa, dado que pueden existir preocupaciones relacionadas con la seguridad, el ruido y la privacidad que estos vehículos pueden generar. En términos de regulación, los aerotaxis necesitan de un marco normativo específico que garantice tanto la seguridad como la eficiencia del tráfico aéreo, que como ya se ha indicado en Europa entrará en vigor en mayo 2025.

Además, la infraestructura necesaria para su operación, como los **vertipuertos** para despegues y aterrizajes, representa otro gran desafío, siendo necesaria la integración de este tipo de infraestructuras en el entorno urbano, así como su proliferación para poder ofrecer algo parecido a un servicio puerta a puerta real.

A nivel económico, el costo de utilizar aerotaxis podría ser superior al de otras formas de transporte, lo que limitaría su accesibilidad y uso generalizado.

Desde la perspectiva tecnológica, aunque ha habido avances significativos, aún existen obstáculos importantes por superar, como la mejora en la duración de las baterías eléctricas, y por ende, la autonomía de vuelo y radio de alcance de los aerotaxis. Por último, el impacto ambiental de los aerotaxis, aunque potencialmente menor que el de los vehículos propulsados por combustibles fósiles, sigue siendo una preocupación, especialmente si se tiene en cuenta el origen de la electricidad empleada.

Partiendo de los beneficios y desafíos mencionados surge con fuerza la figura del Metro Aéreo, que, a cambio de renunciar al concepto de operación puerta a puerta, permite un uso colectivo basado en la operación de "rutas" preestablecidas y programadas. Para ello es necesario un despliegue de infraestructura más racional y realista en comparación con el servicio de aerotaxi, que requeriría una red más densificada de vertipuertos. Teniendo en cuenta las estimaciones de demanda existentes para el transporte aéreo no tripulado en un medio plazo, y que los estudios estiman una ocupación media de 5 personas para estos vuelos, estos mismos estudios plantean la viabilidad económica del servicio de metro aéreo a partir de 2028.

Otra potencial aplicación de la UAM relacionada con el transporte de personas, se refiere al uso de estos vehículos para la realización de vuelos turísticos por las propias ciudades o sus alrededores, logrando que se asemeje más al de un bus turístico, que al que actualmente se presta en algunas ciudades con el uso de helicópteros. Este servicio mejoraría la experiencia al ser mucho más silencioso que los helicópteros. Además, por su sencillez, puede contar con una red mucho más extensa de puntos de embarque y desembarque, siendo a su vez útil para el desplazamiento por los principales lugares de interés.

2.2. Servicios de Paquetería

Otro de los servicios más popularmente asociado a la UAM es el de transporte de paquetería. Este servicio de entrega de mercancías se basa en un modelo operativo y logístico que integra tecnologías punteras y sistemas de transporte multimodal, para lograr el transporte de bienes en entornos urbanos utilizando vehículos eléctricos, generalmente VTOL, ya sean pilotados remotamente o con un piloto a bordo.

La entrega de mercancías en el marco de la UAM se ha identificado como una de las aplicaciones prioritarias para

las fases iniciales de su despliegue. En términos de logística, este servicio se divide en dos categorías principales: la entrega de última milla y la de larga distancia.

Como se vio en el Capítulo 2, la entrega de última milla se refiere a la última sección de la cadena de suministro, que entrega los bienes a su destino final, y es la que despierta un mayor interés por sus potenciales beneficios.

Por otro lado, la entrega de larga distancia implica el transporte de cargas pesadas o mercancías a granel a través de una ruta con poca infraestructura.

El planteamiento para la gestión de este servicio se prevé a través de centros de operaciones de flota. Estos centros consisten en instalaciones físicas que albergan al personal del operador UAM, y que es responsable de supervisar y comandar las operaciones, garantizando la seguridad y eficiencia de estas.

Los retos a los que se enfrenta el servicio de entrega de mercancías en UAM, son de manera general similares a los mencionados para el servicio de aerotaxi, destacando la preocupación en materia de seguridad, infraestructura y desarrollo tecnológico y normativo. Igualmente, sus potenciales beneficios, también están en línea con los indicados para los aerotaxis, siendo los principales una mayor velocidad y eficiencia en la entrega de mercancías, menor impacto ambiental por contaminación y menor impacto en la congestión del tráfico urbano.

Hay una serie de interrogantes que rodean al servicio de última milla que tendrán que abordar las empresas interesadas y cuya respuesta formará parte del modelo de negocio. Se mencionan aquí por el interés que despiertan:

- ¿Qué productos podrán servirse mediante aeronaves UAM?
- ¿Qué ciudades o regiones tendrán mayor demanda mediante el uso de UAM?
- ¿Habrá que rediseñar las tiendas y almacenes existentes para dar cabida a este tipo de entregas? ¿Será necesario diseñar nuevas infraestructuras o instalaciones adicionales? ¿Servirán los vertipuertos?
- ¿Será necesario acudir a la multimodalidad en las entregas? (Igual que se prevé para el transporte de pasajeros)
- ¿Entenderán las empresas que el uso de la UAM contribuye a lograr sus objetivos de sostenibilidad como propugnan la OACI y la ONU?

2.3. Aplicaciones emergentes

Tras haber identificado las dos principales aplicaciones que la UAM puede brindar, cabe destacar que su alcance no queda ni mucho menos tan limitado. La UAM tiene el potencial de abarcar una variedad más amplia de nuevas aplicaciones emergentes. Una de estas aplicaciones es el transporte de personal médico de emergencia a la escena de un accidente o el transporte de pacientes a un hospital. Las aeronaves de transporte de pasajeros pueden utilizarse para este propósito o pueden modificarse para misiones de emergencia.

Un aspecto favorable es la reducción del ruido, comparado con los servicios médicos de emergencia terrestres, lo cual es una ventaja en áreas urbanas densamente pobladas.

Además, los UAS pueden ser utilizados para casos de emergencia como la evaluación de áreas de emergencia, la lucha directa contra incendios y la entrega de suministros médicos y de emergencia. Los usos enunciados trascienden el concepto UAM, mientras que la lucha contra incendios y la evaluación de áreas de emergencia podrían englobarse dentro de la IAM, la entrega de suministros médicos y de emergencia sí entraría dentro del concepto UAM propiamente dicho.

3. AERONAVES (VTOL)

Plantear el modo aéreo como una opción viable para la UAM o RAM (Regional Air Mobility) supone contemplar una evolución significativa en cómo se concibe el transporte en las ciudades. Tradicionalmente, los helicópteros han ofrecido una alternativa para el transporte aéreo en distancias cortas a medias, pero no sin enfrentarse a limitaciones sustanciales. El ruido significativo, los altos costos operativos y de mantenimiento, y las exigentes infraestructuras de aterrizaje, han restringido su uso principalmente a aplicaciones de: emergencia, vigilancia (tanto policial o de fronteras como del tráfico), o para turismo de personas con alto poder adquisitivo.

En respuesta a estas limitaciones, la industria ha comenzado a explorar nuevas tecnologías, buscando soluciones más sostenibles y accesibles. Este enfoque ha coincidido con un aumento en la capacidad de automatización, el desarrollo de nuevos conceptos operacionales, y una creciente concienciación sobre la importancia del respeto al medio ambiente. La solución identificada se encuentra en los vehículos VTOL.

En los siguientes apartados se expone una agrupación en categorías de los diferentes modelos de vehículos VTOL

actualmente existentes. Esta propuesta de clasificación se plantea a finales de 2023 en un metaanálisis de más de 180 estudios y proyectos concretos de fabricantes, centrados en el transporte de personas.

3.1. Tipos de vehículos según su motorización

El primer criterio para clasificar los diseños y vehículos existentes es el motor empleado. De forma similar al transporte por carretera, la clara apuesta a futuro en entornos urbanos es la motorización eléctrica.

Motores de Combustión Interna (ICE): destacan por su alta densidad energética y capacidad de mejorar significativamente el radio de alcance y el tiempo de vuelo del VTOL, ideales para misiones regionales, aunque su uso en entornos urbanos es limitado debido al ruido y las emisiones.

Sistemas Híbridos Eléctricos: combinan las ventajas de los motores eléctricos y los de combustión, ofreciendo mayor eficiencia energética y menores emisiones. Permiten operaciones de bajo ruido y cero emisiones en fases críticas del vuelo, con el motor de combustión extendiendo el alcance cuando es necesario.

Arquitecturas Totalmente Eléctricas: impulsadas por la demanda de operaciones sin emisiones directas y bajo nivel de ruido, son ideales para misiones cortas intraurbanas. Sin embargo, las limitaciones actuales de las baterías restringen su alcance, haciendo menos viable su uso para transporte regional. Precisamente esta limitación en las baterías es el principal desafío al que se enfrentan los conceptos de aeronaves basados en arquitecturas totalmente eléctricas. La densidad energética de las baterías, actualmente en torno a 225 Wh/kg, se estima que debería aumentar hasta al menos 400 Wh/kg para mejorar significativamente el alcance y reducir el peso de la aeronave. Por establecer una comparación, un coche eléctrico tipo Tesla Model S monta baterías de alrededor de 125 Wh/kg.

Los sistemas de baterías para aeronaves eVTOL operan con corrientes de descarga muy altas y deben ofrecer garantías de funcionamiento continuo. Además, la necesidad de recargas rápidas y el uso intensivo aceleran el envejecimiento de estas, lo que implica reemplazos más frecuentes, estimados cada 3-5 meses para mantener una operación segura. También es crítico desarrollar sistemas de intercambio de baterías y realizar pruebas rigurosas de seguridad entre vuelos para garantizar que las baterías se cambien y aseguren correctamente.

3.2. Tipos de vehículos según su diseño de configuración de rotor

Por otro lado, es posible identificar cinco tendencias en el diseño de aeronaves atendiendo a la configuración del sistema de propulsión; dos de ellas pertenecerían al concepto de aeronave de ala rotatoria, y otras tres al de ala fija.

Entre los diseños de **ala rotatoria**, según el número de unidades propulsoras, se encuentran aeronaves multirrotor o de rotor único.

Multirrotor: esta configuración de aeronave VTOL incluye múltiples rotores distribuidos a lo largo del cuerpo del vehículo. Cada rotor contribuye a generar la sustentación necesaria para el despegue y aterrizaje vertical, así como para el control de movimiento y estabilidad durante el vuelo. Los multirrotores son capaces de operar en áreas con espacio limitado, lo que los hace adecuados para entornos urbanos densos.



Ilustración 10. EHang (China) 216 del CNP. [Fuente: <https://www.jetphotos.com/photo/11080478>].

Rotor único: en el diseño de rotor único, la aeronave utiliza un solo gran rotor para proporcionar la fuerza de sustentación principal. Este tipo de configuración es similar a la de un helicóptero tradicional. El rotor se encuentra en la parte superior de la aeronave y es responsable tanto de la sustentación como de la propulsión.



Ilustración 11. FlyNow Aviation (Austria) eCopter. [Fuente: <https://www.flynow-aviation.com>].

Por su parte, los diseños de **ala fija** quedan divididos en las siguientes categorías:

Lift + Cruise: Las aeronaves de tipo Lift + Cruise cuentan con dos sistemas de propulsión independientes: uno dedicado a proporcionar sustentación para el despegue y aterrizaje vertical, y otro que genera el empuje necesario para el vuelo horizontal. Este diseño permite que la aeronave combine las capacidades de despegue vertical con la eficiencia del vuelo de crucero de las aeronaves de ala fija.

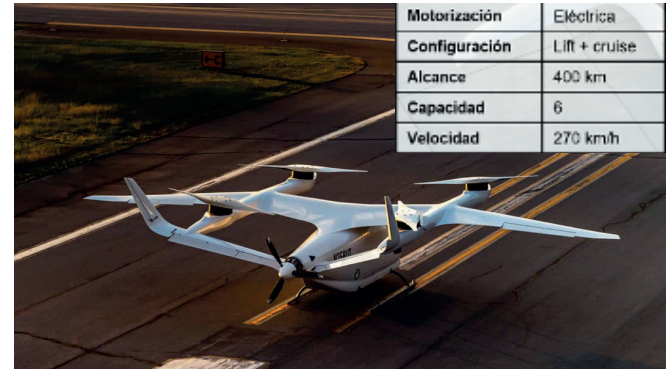


Ilustración 12. Beta Technologies (EEUU) ALIA-250. [Fuente: <https://www.beta.team/aircraft/>].

Tilt-rotor: El diseño de tilt-rotor incluye rotores que pueden inclinarse para cambiar la dirección del empuje. En la configuración vertical, los rotores permiten el despegue y aterrizaje como un helicóptero. Una vez en el aire, los rotores se inclinan hacia adelante, transformando la aeronave para el vuelo de crucero similar al de un avión convencional, utilizando las alas para sustentación.



Ilustración 13. Crisalión Mobility (España) integrity 6, diseño conceptual. [Fuente: <https://evtol.news/crisalion-mobility-integrity-6>].

Tilt-wing: Similar al tilt-rotor en su objetivo, el tilt-wing incorpora alas que se pueden inclinar. En lugar de variar el ángulo solo los rotores, es toda el ala la que gira, incluidos los motores y rotores, para cambiar entre las configuraciones de despegue vertical y vuelo horizontal.

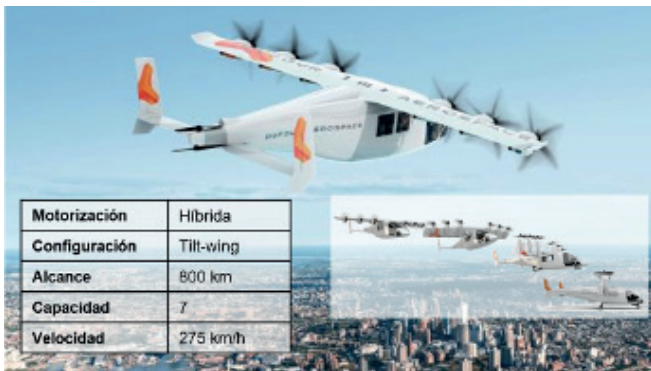


Ilustración 14. Dufour Aerospace (Suiza) Aero 3, diseño conceptual. [Fuente: LinkedIn].

Estos diseños tienen aspectos positivos que pueden hacerlos adecuados para misiones concretas dentro de la UAM, como se explorará en la siguiente sección; pero también presentan desafíos y limitaciones. En las siguientes tablas se compilan las ventajas e inconvenientes de cada una de las configuraciones comentadas anteriormente.

Multirrotor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Gran maniobrabilidad y eficiencia en el despegue y aterrizaje vertical, ideal para misiones urbanas de corta distancia. Estructuralmente más simple, con menores costos de producción y mantenimiento. Alta redundancia en sistemas de propulsión. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor generación de ruido. Menor eficiencia en crucero y alcance reducido debido a alta resistencia aerodinámica. Elevado consumo de energía. Limitaciones en capacidad de carga debido al diseño compacto.

Rotor único

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Mejor capacidad de alcance en comparación con los multirrotor debido a una menor resistencia aerodinámica y mayor eficiencia en vuelo horizontal. Diseño probado y fiable (sucesor del helicóptero), con menor complejidad en el control de vuelo. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor complejidad mecánica y costos de mantenimiento en comparación con configuraciones de ala fija. Menor seguridad en caso de fallo del rotor principal debido a la falta de redundancia.

Lift + Cruise

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia aerodinámica durante el vuelo en crucero debido a la generación de sustentación por las alas, lo que permite mayores distancias de viaje. Configuración relativamente simple y desarrollo tecnológico avanzado, con buena relación de carga útil a peso total. 	<ul style="list-style-type: none"> Complejidad mecánica asociada a la necesidad de dos sistemas de propulsión separados. Menor maniobrabilidad en vuelo en comparación con configuraciones sin ala fija.

Tilt-rotor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia en crucero y capacidad de carga debido a un mejor coeficiente de sustentación/resistencia. Capaz de alcanzar mayores velocidades y distancias, combinando las ventajas de los helicópteros y los aviones de ala fija. Flexibilidad operativa en diferentes escenarios. Capacidad de orientar el empuje y aprovechar la sustentación del ala a la vez. 	<ul style="list-style-type: none"> Complejidad mecánica asociada a los mecanismos de inclinación. Mayor consumo energético durante las fases de transición de vuelo.

Tilt-wing

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia en crucero similar a los tilt-rotor, con una buena relación de sustentación/resistencia. Capaz de realizar despegues y aterrizajes verticales y luego transitar a un vuelo eficiente en crucero, combinando las ventajas de los aviones de ala fija y los helicópteros. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor complejidad mecánica debido a la inclinación del ala entera. Desarrollo tecnológico menos avanzado en comparación con otras configuraciones, con menos pruebas y datos disponibles. Mayor consumo de energía en transición. Transición menos ágil en comparación con configuraciones de tilt-rotor.

Tras evaluar las ventajas y desventajas de diferentes configuraciones de vehículos VTOL en el contexto de UAM (y la RAM), cabe plantear cómo estos vehículos pueden optimizarse para aplicaciones específicas en entornos urbanos y regionales. Derivado de ello, se pueden clasificar los diferentes **escenarios operativos**:

Intra-ciudad (Intra-City): en escenarios propiamente urbanos, con zonas densamente pobladas y edificadas, el riesgo en tierra se convierte en un factor crítico. Se requieren aeronaves ligeras y fácilmente maniobrables. Aspectos como la velocidad o el alcance cobran un menor peso, ya que se trataría de rangos inferiores a los 25 km, generalmente. Este hecho, sumado a la lógica demanda de motorizaciones eléctricas, haría que destacasen configuraciones multirrotor. Estas aeronaves requieren de una menor infraestructura para operar, y resultarían ideales para un transporte punto a punto rápido y directo, evitando congestiones del tráfico terrestre.

Suburbano y zona metropolitana (mega-city): en este tipo de misiones se busca cubrir la conexión entre puntos de grandes áreas metropolitanas, o de la ciudad con sus alrededores. Contempla rangos comprendidos entre 25-100 km, en los que la velocidad y la capacidad de pasajeros adquiere una mayor relevancia. Resultarían más adecuadas configuraciones de ala fija, tipo lift+cruise o tilt-rotor, que combinen la eficiencia del vuelo de crucero con la capacidad de vuelo estacionario y la maniobrabilidad requerida para operar en entornos urbanos. Dependiendo del entorno

específico y, sobre todo, de la capacidad que se requiriese, a medio plazo se esperaría un predominio de motorizaciones híbridas.

Regional (intercity): esta modalidad abarca viajes interurbanos o regionales que pueden exceder los 100 km, pero que no llegarían a los rangos propios de la aviación convencional. Quedarían aquí englobadas operaciones entre diferentes núcleos urbanos con la ventaja de que no se requiere infraestructura aeroportuaria. El alcance y la velocidad son los dos factores esenciales, por lo que volverían a destacar configuraciones Tiltrotor o Tilt-Wing. Estos modelos, con su capacidad variable de pasajeros, ofrecen la posibilidad de viajar a distancias más largas con comodidad y rapidez, reduciendo significativamente el tiempo de viaje en comparación con el transporte terrestre.



Ilustración 15 EHang 216 sobrevolando la ciudad china de Zhuhai. [Fuente: <https://www.drivingeco.com/ehang-216/>].

3.3. Regulación y certificación

La rápida evolución de la tecnología y los diseños de aeronaves VTOL presentan desafíos significativos para los reguladores.

En el ámbito europeo, EASA ha tenido que adaptarse a estos cambios y, como ya indicamos anteriormente, ha desarrollado especificaciones técnicas en forma de una condición especial para aeronaves VTOL, que pasa a denominar VCA (VTOL Capable Aircraft). Estas especificaciones abordan las características únicas de los VTOL, prescribiendo estándares de aeronavegabilidad para la emisión y modificación del certificado de tipo. Este enfoque pretende garantizar una evaluación exhaustiva en términos de seguridad, rendimiento y fiabilidad. Además, es fundamental que organismos como la EASA colaboren con los fabricantes y operadores para integrar de forma segura las aeronaves en el espacio aéreo

urbano, adoptando regulaciones flexibles que impulsen la innovación en la UAM sin comprometer la seguridad.

China ha sido el país pionero al emitir el primer certificado de tipo para el EHang 216, convirtiendo a este fabricante en el primer explotador comercial de vehículos autónomos para el transporte de personas por el medio aéreo.

El fabricante E-Hang también ha sido el primero en inaugurar un centro en Europa de UAM que está situado en el aeropuerto de Lleida. Lo que pretenden, en palabras de su presidente director ejecutivo es “compartir nuestra tecnología certificada y validada y nuestra experiencia operativa con nuestros socios en todo el mundo en el futuro, para hacer realidad nuestra visión compartida de beneficiar a toda la sociedad con soluciones UAM seguras, autónomas y ecológicas”.

Por su parte, la FAA estadounidense está en pleno proceso de adaptación de su Código de Regulaciones Federales para la certificación de tipo de aeronaves motorizadas, concretamente el título 14 parte 21.17(b) [40], con el fin de incluir las aeronaves VTOL, cubriendo aspectos tales como el establecimiento de criterios de diseño para la certificación, la integración de sistemas, control de ruidos y cumplimiento de normas de aeronavegabilidad.

En resumen, actualmente las principales agencias reguladoras de aviación a nivel global se encuentran en un proceso de adaptación para hacer frente a los retos que plantea la irrupción de los UAS, y especialmente la UAM, en el transporte de personas y mercancías. Dentro de este escenario, la certificación de los vehículos VTOL representa uno de los mayores retos, tanto técnico como económico, de cara a su implantación.

4. VERTIPUERTOS

4.1. Integración con el transporte urbano

Como ya se vio en el Capítulo 3, los **vertipuertos** son infraestructuras similares funcionalmente a los helipuertos, pero adaptados para acomodar a toda esta nueva flota de aeronaves VTOL. Estas instalaciones son cruciales para el desarrollo y la implementación de las nuevas soluciones de movilidad aérea en áreas metropolitanas densamente pobladas comprendidas dentro del concepto de la UAM.

Su integración dentro del ecosistema urbano tiene el potencial de suponer una capacidad intermodal sin

precedente, pudiendo ser accesible desde estaciones de cualquier sistema de transporte urbano. En la consecución de este fin juega un papel fundamental el empleo de una red nodal de vertipuertos, en todas sus modalidades, incluyendo los **vertihubs** y los **vertistops**.

Los **vertihubs** contarían con la capacidad de actuar como punto central desde el cual se establecerían conexiones con otros nodos, conformando lo que se denomina una red de tipo **Hub&Spoke**. Por sus características, esta configuración sería típica de zonas suburbanas o periféricas, donde la limitación de espacio no es tan crítica como en el centro de las ciudades; pero siempre en áreas de alto tráfico donde tendría sentido operar bajo este modelo. En estas instalaciones se prestarán todo tipo de servicios a aeronaves y pasajeros, siendo previsible que se conviertan en las bases de operaciones de los operadores UAM, con espacio para guardar las aeronaves durante la noche cuando no estén en uso, y alberguen también las oficinas del propio personal de gestión del vertipuerto, como ya se indicó en el apartado dedicado a vertipuertos del Capítulo 3.



Ilustración 16. Vertihub [Imagen generada con IA].

Por su parte, el **vertistop** se corresponde con una instalación mínimamente desarrollada para el embarque y desembarque de pasajeros o carga de aeronaves VTOL. Para que resulte más ilustrativo, la relación entre un vertipuerto y un vertistop es comparable a la existente entre una terminal de autobuses y una parada de autobús, en relación con los servicios que se prestan o no (repostaje, mantenimiento, estacionamiento, etc.).



Ilustración 17. Vertistop [Imagen generada con IA].

Dentro del ecosistema UAM, jugarán un papel destacado en la conexión con el entorno aeroportuario, dando soporte a uno de los principales nichos de negocio que se vieron en el apartado 2, como son los aerotaxis para traslados a aeropuertos. Esto solo se podrá lograr a través de una integración de las operaciones UAM dentro de la gestión, no solo del espacio aéreo controlado, sino más concretamente del tráfico aeroportuario.

Supondrán el verdadero nexo de unión entre los medios de transporte urbano tradicionales y la UAM, encarnada en este caso en el servicio de Metro Aéreo. Estas infraestructuras distribuidas estratégicamente a lo largo del entorno urbano posibilitarán una intermodalidad real desde los principales intercambiadores de autobuses, trenes y otros sistemas de transporte (metro, tranvías, etc.)

Además de estos tipos de vertipuertos, no se debe olvidar la importancia que tendrá la red de vertipuertos “convencionales” (que no se correspondan con vertihub o vertistop), imprescindibles para prestar el servicio de aerotaxi “puerta a puerta” y las aplicaciones sanitarias o de paquetería, y las zonas de aterrizaje de emergencias distribuidas por las áreas de operación.

4.2. Despliegue de la red de vertipuertos

Una buena estrategia de despliegue de la red de **vertipuertos** en las áreas de operación es uno de los principales desafíos a superar para la implementación efectiva de sus aplicaciones en la UAM. Por un lado, deberá permitir una intermodalidad de transporte urbano, como ya se ha citado.

Pero, además, es necesaria una densificación adecuada de estas instalaciones, no solo para dotar de flexibilidad a los servicios, sino para garantizar unos niveles de seguridad en la operación suficientes.

Con esto en mente, la red de vertipuertos deberá incluir infraestructuras con diferentes niveles de equipamiento, en función del rol que desempeñe cada una dentro de la planificación de rutas. Por un lado, adicionalmente a los vertipuertos de origen y destino entre los que se opera un vuelo, deberán existir **vertipuertos alternativos** completamente equipados, que permitan el desvío de los vuelos en caso de contingencias durante la fase de ruta, similares a los aeródromos alternativos que emplea la aviación tripulada. Por otro lado, para garantizar la seguridad del vuelo, en caso de no poder alcanzarse estos vertipuertos alternativos, se hace necesaria la figura de los vertipuertos para CSFL (Continued Safe Flight and Landing), que al contrario que los alternativos, solo se les exija contar con unas características mínimas para permitir un aterrizaje seguro, no siendo imprescindible que estén equipados para la realización de operaciones de despegue. Por último, están las zonas para aterrizaje de emergencia que servirán como último recurso en caso de no poderse alcanzar ninguna de las instalaciones anteriores, si bien en este caso se trata de una identificación de estas áreas que no tienen por qué considerarse como instalaciones en sí.

En las primeras etapas de despliegue de la red de vertipuertos, se aprovecharán los helipuertos existentes, como los situados en los hospitales, edificios corporativos, de emergencia, etc. pudiendo adecuarse estas infraestructuras o limitar su uso en función del equipamiento con el que cuenten. Sin embargo, para una implementación real de la UAM, será necesario incluir el despliegue de la red de vertipuertos dentro de los planeamientos urbanísticos, como ya se indicó anteriormente, siguiendo una estrategia prediseñada que se adapte a las aplicaciones y servicios UAM que se quieran ofrecer, basados en las necesidades de movilidad ciudadana. Esta estrategia deberá considerar aspectos como la reducción del impacto ambiental y acústico, o la afectación a la privacidad, sin olvidar la más obvia de todas: la seguridad. Deberán desarrollarse normativas a nivel estatal, regional o local, que limiten u ordenen la proliferación de estas infraestructuras en zonas residenciales, áreas escolares o recintos donde se produzcan grandes concentraciones de personas, así como que colaboren a preservar el paisaje urbano ayudando a la aceptación social. En esta parte jugarán un papel fundamental los poderes municipales o locales.

Respecto a los vertipuertos destinados específicamente para los servicios de paquetería, aunque de manera general

están sujetos a los criterios y limitaciones equivalentes a los destinados al transporte de personas, se prevén una serie de particularidades basadas en sus necesidades logísticas. Por ejemplo, en lo que se refiere a su ubicación, los estudios indican que los vertipuertos destinados a la entrega de mercancías deben situarse cerca de los clientes (entendiendo cliente como quien realiza el envío, por ejemplo, un almacén o tienda) para optimizar la demanda máxima. Por ello la ubicación de los vertipuertos se determinará en función del tiempo de viaje en tierra desde el origen del cliente hasta el lugar de recogida, que se identifica como un factor limitante crucial que afecta a la cantidad de clientes atendidos por un vertipuerto. También se estudia que la red de vertipuertos incluidos dentro de los servicios de paquetería, permitan un umbral de conducción de última milla de 10 minutos, es decir, se sitúe a menos de 10 minutos por transporte terrestre del destinatario final.

Además de todo lo anterior, se está considerando la necesidad de que los vertipuertos destinados a la UAM compartan la disponibilidad actual y la planificación para ser utilizados en el servicio de gestión de emergencia, entre otros.

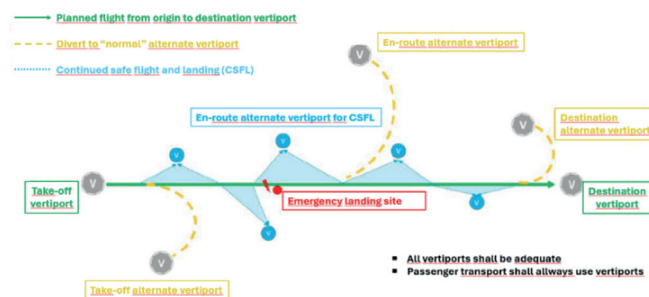


Ilustración 18 Ejemplo de red de vertipuertos para ruta [Fuente: EASA PTS-VPT-DSN] [41].

5. VIABILIDAD DE LA UAM

El potencial de la UAM para mejorar la movilidad urbana es significativo; sin embargo, no todas las ciudades están trabajando para establecer los elementos necesarios para posibilitarla. No obstante, no todas están preparadas para iniciar las operaciones UAM ni presentan cifras estimadas de negocio favorables.

El 30 de junio de 2024, el Luthansa Innovation Hub publicó un interesante informe [42] sobre la viabilidad de las operaciones de AAM en varias ciudades de Estados Unidos y Europa. Las ciudades elegidas, a priori, presentaban

gran potencial para las operaciones AAM. Los parámetros analizados fueron los siguientes:

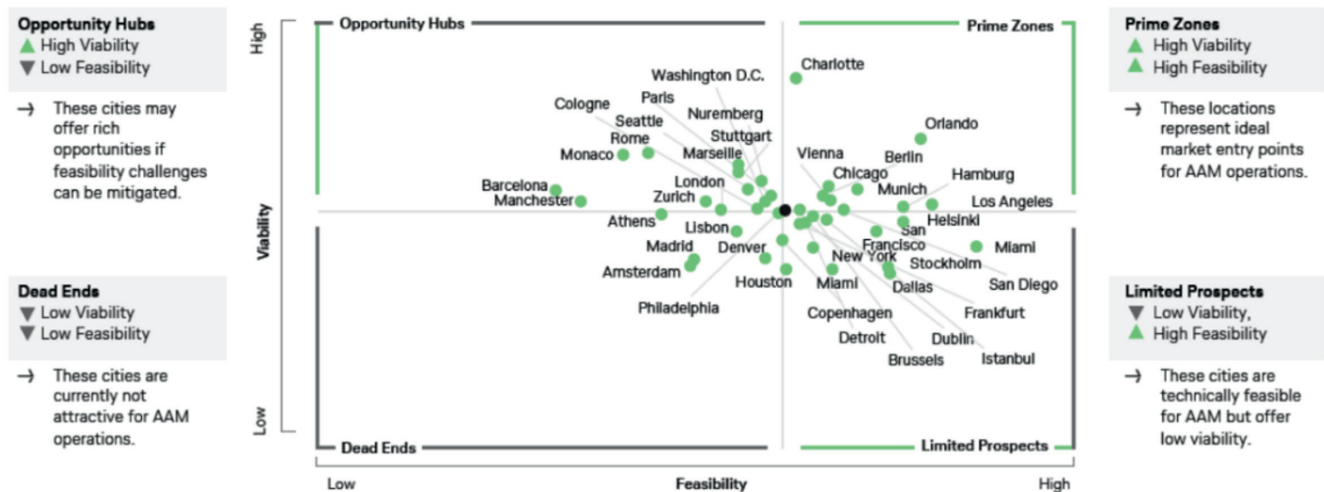
- Análisis del terreno: características que pudieran impactar en los planes de vuelo como la presencia de obstáculos.
- Análisis del espacio aéreo: existencia de rutas para la aviación comercial, necesidades militares de reserva de espacio aéreo.
- Análisis de la autoridad: legislación nacional y local, grado de aceptación para acoger nuevos conceptos e iniciativas sobre AAM.
- Análisis meteorológico: patrones predominantes y estacionales en la región e impacto de las condiciones meteorológicas en la operatividad de la AAM.

- Factores locales: congestión y polución, aeropuertos cercanos, coste del suelo.
- Ahorro de tiempo: existencia de transporte terrestre y su nivel de eficiencia.

Las ciudades seleccionadas (entre ellas Madrid y Barcelona), se situaron en un mapa bidimensional con 2 parámetros: factibilidad (terreno, espacio aéreo, autoridades locales) y viabilidad (aspectos meteorológicos, área de impacto positivo, tiempo ahorrado en los desplazamientos). Sólo unas pocas ciudades aprueban el examen de Lufthansa Innovation Hub:

- En Estados Unidos: Charlotte, Orlando, Los Ángeles, Chicago.
- En Europa: Viena, Berlín, Múnich, Hamburgo.

The AAM Route Attractiveness Matrix



Source: Lufthansa Innovation Hub, V2AIR, Roland Berger, Unisphere

Ilustración 19. Top Launch Regions for AAM [Fuente:Lufthansa Innovation Hub] [42].

Si bien es cierto que el estudio puede tener un cierto sesgo, y que se necesitan más análisis de este tipo, el potencial de la UAM parece innegable, pero debe ser demostrado antes de ver operaciones UAM comerciales realmente rentables.

Para finalizar, aunque en este capítulo no hemos incidido en el aspecto económico de la UAM, sí hemos mencionado los problemas financieros de las empresas que están desarrollando los VTOL, como Lillium [43]. A finales de 2024 VOLOCOPTER GmbH también presentó una solicitud de apertura de un procedimiento de insolvencia ante el Juzgado Local de Karlsruhe [44]. Los exigentes

procesos de certificación de estas aeronaves, junto con la incertidumbre en cuanto a la posibilidad de inicio de las operaciones (VOLOCOPTER había anunciado vuelos con pasajeros durante los Juegos Olímpicos de París 2024, que finalmente no fueron posibles) dificultan en gran medida la atracción de posibles inversores. Aun así, las últimas noticias apuntan a que Lillium ha encontrado un comprador [45] para continuar con el desarrollo de sus aeronaves. En el caso de VOLOCOPTER ha sido adquirida por Heptus 591, con sede en Berlín, filial del fabricante chino de piezas y equipos para automóviles Wanfeng Auto Wheel Co [46].

CONCLUSIONES

La Movilidad Urbana Aérea (UAM), tanto en la visión estadounidense (AAM, Advanced Air Mobility), como en la europea (IAM, Innovative Air Mobility), está emergiendo como una solución innovadora para el transporte en áreas urbanas densamente pobladas, o en su versión extendida al ámbito regional, RAM (Regional Air Mobility). El uso de aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) para transportar pasajeros y mercancías -inicialmente pilotadas a bordo, y a medio plazo pilotadas de forma remota, para finalmente llegar a ser completamente autónomas- se espera que genere beneficios ambientales, económicos y sociales. Actualmente, se están llevando a cabo proyectos piloto y demostraciones en varias ciudades europeas, con la expectativa de que las operaciones comerciales comiencen en los próximos años.

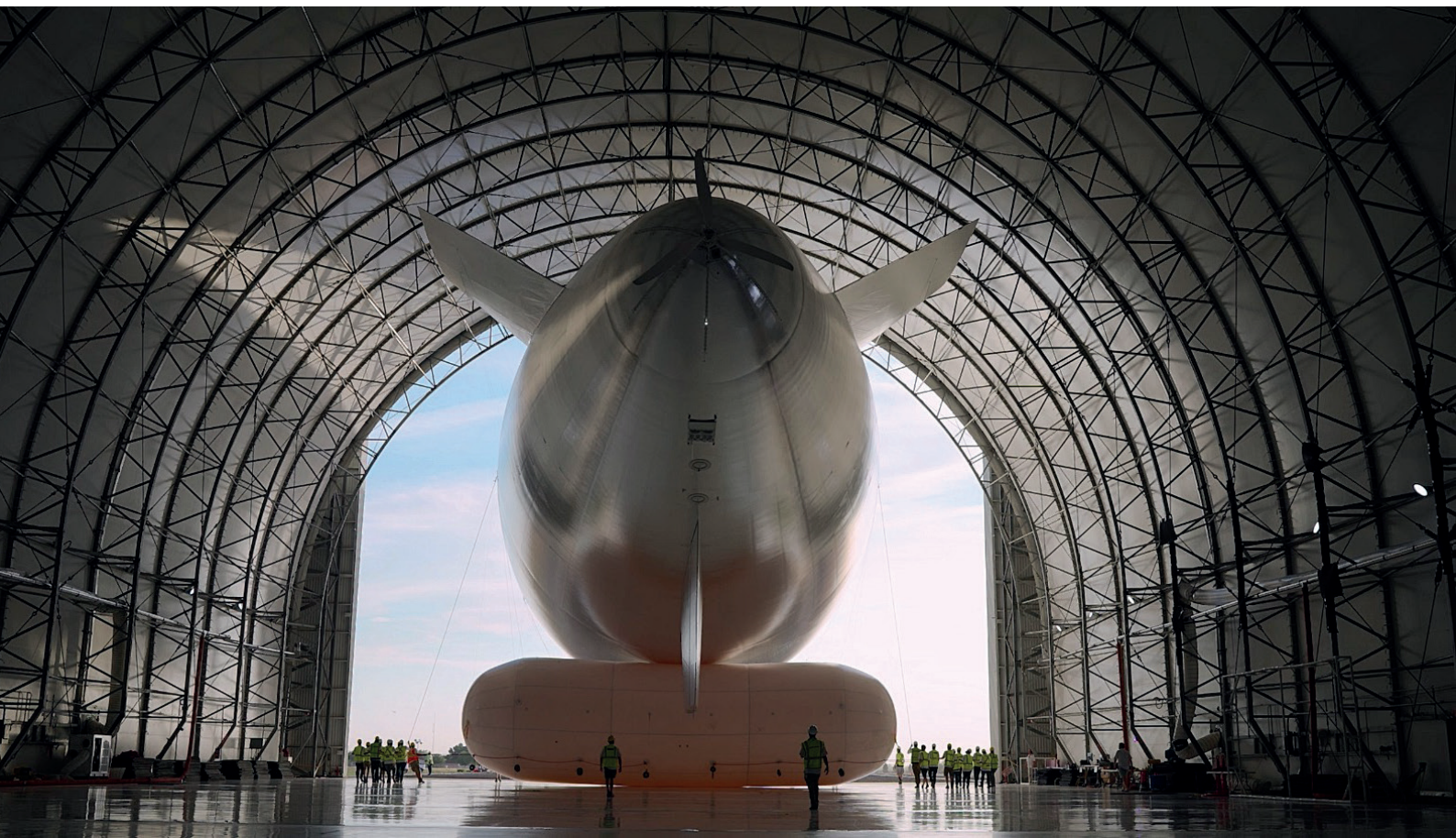
Hasta la implantación operacional de la UAM todavía queda un camino largo que recorrer, compuesto por, entre otros, los siguientes pasos: identificación de las soluciones de diseño más eficientes que conduzcan a la convergencia de configuraciones de UAS; avances tecnológicos en sistemas de almacenamiento de energía, sistemas de comunicaciones/navegación/vigilancia, digitalización y automatización; desarrollo de infraestructura en tierra con una red de vertipuertos integrados en el sistema de transporte intermodal urbano; evolución del sistema ATM y desarrollo e implantación de los sistemas UTM/U-Space que permitan la integración segura y ordenada de la UAM en el espacio aéreo junto al resto de los usuarios; desarrollo el cuerpo normativo que regule la participación de todos los actores implicados; y finalmente, pero no menos importante, conseguir la aceptación social y la confianza como elemento clave del éxito. A medida que se resuelvan todos estos desafíos tecnológicos, regulatorios y sociales, se avanzará en la implantación progresiva de la UAM, ofreciendo una alternativa eficiente y sostenible al transporte tradicional.

REFERENCIAS

1. Informe Especial 2020-06 “Movilidad urbana sostenible en la UE: No es posible una mejora sustancial sin el compromiso de los Estados miembros”. Tribunal de Cuentas Europeo, 2020. Unión Europea.
<https://www.eca.europa.eu/es/publications?did=53246>
2. El Nuevo Marco de Movilidad Urbana de la UE. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, 2021. COM(2021) 811
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0811&from=ES>
3. Unmanned Aerial Systems as a Driving Force in the Digital Information Age. Joseph Hupy, Ryan Case, Haoruo Fu and Dylan Kloas, 2023. Eng Technol. Open Acc. Journal; 4(4): 555647.
<https://juniperpublishers.com/etoaj/pdf/ETOAJ.MS.ID.555647.pdf>
4. One Word Change Expands NASA's Vision for Future Airspace Mobility
<https://www.nasa.gov/aeronautics/one-word-change-expands-nasas-vision-for-future-airspace-mobility/>
5. Advancing Aerial Mobility – A National Blueprint. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2020. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/25646>.
6. Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations (ConOps) v1.0. Federal Aviation Administration Office of NextGen, 2020.
https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf
7. An Act To plan for and coordinate efforts to integrate advanced air mobility aircraft into the national airspace system, and for other purposes. Congreso de los EEUU Pub. L. 117–203, 2022.
<https://www.congress.gov/117/plaws/publ203/PLAW-117publ203.pdf>
8. Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations (ConOps) v2.0. Federal Aviation Administration Office of NextGen, 2023.
https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0_1.pdf
9. Advanced Air Mobility (AAM) Implementation Plan Version 1.0. Federal Aviation Administration, 2023.
<https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/AAM-I28-Implementation-Plan.pdf>
10. Reglamento FAA Capítulo 11 UAS Sección 6: Advanced Air Mobility. Federal Aviation Administration, 2023.
https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap11_section_6.html
11. Report of the Drone Leaders' Group in support of the preparation of 'A Drone Strategy 2.0 for a Smart and Sustainable Unmanned Aircraft Eco-System in Europe'. 26 April 2022.
https://transport.ec.europa.eu/system/files/2022-05/Drone_Leaders_Group_Report_2022-04-26.pdf
12. Una Estrategia 2.0 para los drones encaminada a lograr un ecosistema de aeronaves no tripuladas inteligente y sostenible en Europa. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y

- Social Europeo y al Comité de las Regiones, 2022. COM(2022) 652 final
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0652>
13. Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe. European Union Aviation Safety Agency, 2021.
<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf>
 14. Commission Delegated Regulation (EU) 2024/1107 of 13 March 2024 supplementing Regulation (EU) 2018/1139 of the European Parliament and of the Council by laying down detailed rules for the continuing airworthiness of certified unmanned aircraft systems and their components, and on the approval of organisations and personnel involved in these tasks. Official Journal of the European Union, 2024.
https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2024/1107/oj
 15. Commission Delegated Regulation (EU) 2024/1108 of 13 March 2024 amending Regulation (EU) No 748/2012 as regards the initial airworthiness of unmanned aircraft systems subject to certification and Delegated Regulation (EU) 2019/945 as regards unmanned aircraft systems and third-country operators of unmanned aircraft systems. Official Journal of the European Union, 2024.
https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2024/1108/oj
 16. Commission Implementing Regulation (EU) 2024/1109 of 10 April 2024 laying down rules for the application of Regulation (EU) 2018/1139 of the European Parliament and of the Council as regards competent authority requirements and administrative procedures for the certification, oversight and enforcement of the continuing airworthiness of certified unmanned aircraft systems, and amending Implementing Regulation (EU) 2023/203. Official Journal of the European Union, 2024.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1109&qid=1729955278653>
 17. Commission Implementing Regulation (EU) 2024/1110 of 10 April 2024 amending Regulation (EU) No 748/2012 as regards the initial airworthiness of unmanned aircraft systems subject to certification and Implementing Regulation (EU) 2019/947 as regards the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. Official Journal of the European Union, 2024.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1110&qid=1729955305809>
 18. Commission Implementing Regulation (EU) 2024/1111 of 10 April 2024 amending Regulation (EU) No 1178/2011, Implementing Regulation (EU) No 923/2012, Regulation (EU) No 965/2012 and Implementing Regulation (EU) 2017/373, as regards the establishment of requirements for the operation of manned aircraft with a vertical take-off and landing capability. Official Journal of the European Union, 2024.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1111&qid=1729955324458>
 19. NPA 2024-6: Introduction of a regulatory framework for the operation of drones — Enabling the initial airworthiness of UAS subject to certification, and the continuing airworthiness of those UAS operated in the 'specific' category. European Union Aviation Safety Agency, 2024.
<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/notices-of-proposed-amendment/npa-2024-06>
 20. Innovative Air Mobility Hub. EASA, 2024
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/drones-air-mobility-landscape/innovative-air-mobility-hub>
 21. Innovative Air Mobility Task force. EASA, 2024
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/drones-air-mobility-landscape/basics-explained/innovative-air-mobility-and-services>
 22. Proyecto AMU-LED: Air Mobility Urban Large Experimental Demonstrations. SESAR, 2020.
<https://www.sesarju.eu/projects/AMU-LED>
 23. U-Space Blueprint SESAR Joint Undertaking, 2017
<https://www.sesarju.eu/u-space-blueprint>
 24. PJ34-W3 AURA ATM U-Space Interface
<https://www.sesarju.eu/projects/aura>
 25. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 de la Comisión de 22 de abril de 2021 sobre un marco regulador para el U-Space. Diario Oficial de la Unión Europea, 2021.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0664&from=EN>
 26. Reglamento de Ejecución (UE) 2017/373 de la Comisión, de 1 de marzo de 2017, por el que se establecen requisitos comunes para los proveedores de servicios de gestión del tránsito aéreo/navegación aérea y otras funciones de la red de gestión del tránsito aéreo y su supervisión, por el que se derogan el Reglamento (CE) n.º 482/2008 y los Reglamentos de Ejecución (UE) n.º 1034/2011, (UE) n.º 1035/2011 y (UE) 2016/1377, y por el que se modifica el Reglamento (UE) n.º 677/2011–Requisito ATS.TR.237. Diario Oficial de la Unión Europea, 2017.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32017R0373>
 27. AIRMOUR Enabling sustainable AiR MObility in URrban contexts via emergency and medical services
<https://cordis.europa.eu/project/id/101006601/results>
 28. AURORA Safe Urban Air Mobility For European Citizens
<https://aurora-uam.eu/>
 29. Flying Forward 2020
<https://www.ff2020.eu/>
 30. 10 recomendaciones conjuntas
<https://www.ff2020.eu/news-items/10-recommendations-from-three-uam-projects-flying-forward-2020-airmour-and-aurora/>

31. Plan de Acción Nacional de Despliegue de U-Space 2022-2025 (PANDU). 2ª Edición. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024.
https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/aereo/organizacion_sector_aereo/u-space/plan-de-despliegue-u-space_v2.1_definitiva.pdf
32. Portal para la Coordinación del U-space en España. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024.
<https://www.transportes.gob.es/aviacion-civil/politica-espacio-aereo/portal-para-la-coordinacion-del-u-space-en-espana>
33. OperA Operate Anywhere 2023-2026
<https://www.sesarju.eu/projects/OperAhttps://project-opera.eu/>
34. EUREKA European Key solutions for vertiports and UAM 2023-2026
<https://www.sesarju.eu/projects/EUREKA>
35. SPATIO U-Space Separation Management 2023-2026.
<https://www.sesarju.eu/news/advancing-u-space-separation-management-safer-skies>
<https://www.sesarju.eu/projects/SPATIO>
36. BUBBLES Defining the BUilding Basic BLocks for a U-Space SEparation Management Service 2020-2022
<https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/events/dronedays2022/1%20-%20BUBBLES%20pitch%20-%20EU%20Drone%20Days%202022.pdf>
<https://www.sesarju.eu/projects/bubbles>
37. Decreto de 20 de septiembre de 2023 del Alcalde, por el que se crea la Comisión de Movilidad Aérea Urbana y se regula su composición y funcionamiento. Boletín Oficial del Ayuntamiento de Madrid, 2023.
https://sede.madrid.es/csvfiles/UnidadesDescentralizadas/UDCBOAM/Contenidos/Boletin/2023/Septiembre/Ficheros%20PDF/BOAM_9475_21092023135406341.pdf
38. Urban Air Mobility (UAM) Market Study Final Report. Booz Allen Hamilton, 2018.
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190001472/downloads/20190001472.pdf>
39. Aviation 2030: Passenger use cases in the Advanced Air Mobility revolution. KPMG, 2022.
<https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/ie/pdf/2022/07/ie-advanced-air-mobility-revolution.pdf>
40. Federal Aviation Regulations. 14 CFR 21.17(b). Federal Aviation Administration, 2017.
<https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-21/subpart-B/section-21.17#>
41. Prototype Technical Design Specifications for Vertiports. Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN). European Union Aviation Safety Agency, 2022.
<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/prototype-technical-design-specifications-vertiports>
42. Identifying Top Launch Regions for Advanced Air Mobility A collaborative, data-driven analysis of potential launch cities for AAM. Lufthansa Innovation Hub
<https://a21.com.mx/aeronautica/2024/07/15/identifica-lufthansa-innovation-hub-mejores-ciudades-para-la-movilidad-aerea>
43. Flying taxi startup Lilium faces insolvency if not able to “immediately” raise more capital 04/10/2024.
<https://sifted.eu/articles/lilium-facing-insolvency>
44. Volocopter GmbH Files for Insolvency While Seeking Investors 30/12/2024.
<https://www.volocopter.com/en/newsroom/volocopter-files-for-insolvency-in-germany>
45. Insolvent flying taxi startup Lilium has found a buyer 24/12/2024.
<https://sifted.eu/articles/lilium-bought-insolvency-saved-news>
46. El propietario de Diamond Aircraft adquiere Volocopter 14/03/2025.
<https://www.avionrevue.com/drones/el-propietario-de-diamond-aircraft-adquiere-volocopter/>



Dirigible de la compañía Sceye saliendo del hangar para un vuelo de prueba en Roswell (New Mexico) [Cortesía de la compañía Sceye].

Jaime Torrecilla Puebla
Javier Rosano de Lucas

Una plataforma de gran altitud (HAPS, High Altitude Platform System) es un UAS que opera a grandes altitudes y, por lo general, durante períodos de tiempo prolongado. Los HAPS pueden, en teoría, funcionar de forma permanente o, en la práctica, al menos durante varias semanas o meses antes de que sea necesario aterrizar de nuevo. Al volar en la estratosfera inferior (entre 18 km y 25 km de altitud), los HAPS se encuentran por encima del tráfico aéreo comercial y, por lo tanto, no interfieren con él, salvo durante el ascenso hasta su altura de operación y el descenso durante la recuperación.

La larga permanencia en vuelo de los HAPS, y la baja altura de operación comparado con los satélites, les convierte en candidatos ideales para misiones de observación de la Tierra, de teledetección, o de vigilancia en caso de crisis humanitarias o catástrofes naturales. Al tener menor altitud en comparación con los satélites permite obtener imágenes de mayor resolución. Además, pueden utilizarse para proporcionar conectividad, redes de comunicaciones e Internet tanto en áreas con mala infraestructura de telecomunicaciones, por ejemplo, en áreas de conflicto o regiones donde han ocurrido desastres naturales, como en lugares donde se necesita ancho de banda adicional de manera transitoria, por ejemplo, en zonas turísticas con alta concentración de personas o durante eventos como festivales de música. Además, la mayor altitud de un HAPS permite una mejor cobertura en comparación con las redes terrestres de antenas de radio, al tiempo que permite rutas de señal mucho más cortas que los satélites. Por todo ello, en los últimos años, se han puesto en marcha numerosos proyectos HAPS.



1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de mantener aeronaves en vuelo durante largos periodos de tiempo a altitudes superiores a los 18 km, por encima de las rutas que utiliza la aviación comercial, ha sido un objetivo perseguido durante mucho tiempo por las ventajas operativas que ofrece la prestación de servicios de comunicaciones o de observación de la tierra desde plataformas aéreas situadas en esas altitudes, frente a prestar esos mismos servicios desde torres situadas en tierra, o desde satélites.

El término HAPS, que responde a distintas descripciones (*High Altitude Platform System/Station o High Altitude Pseudo Satellite*) se acuñó a finales de los años 90, lo que reflejaba el creciente interés por utilizar esta tecnología para complementar las redes de comunicación terrestres y satelitales. Más tarde, surgieron otros posibles casos de uso, como la teledetección y la observación y vigilancia de la Tierra para aplicaciones militares y agencias civiles estatales.

Históricamente, las aeronaves tripuladas que volaron a esas altitudes cumplían misiones militares de inteligencia y compensaban la baja densidad del aire con altas velocidades de vuelo y grandes superficies alares. Así, el U2 volaba a altitudes de hasta 21 km (70.000 ft) a una velocidad de 430 kt (796 Km/h) y tenía una autonomía de unas 7 horas de vuelo. El SR71 tenía un techo de operación de 27 km (90.000 ft) y una velocidad de crucero de 3.380 kt (Mach 3.2) pero su autonomía se limitaba a 1.5 horas de vuelo. Con la llegada de los UAS y los avances tecnológicos se ha conseguido aumentar significativamente la autonomía de vuelo. Así, el Global Hawk tiene una autonomía de 35 horas de vuelo, volando a una altitud de 20 km (65.000 ft) y una velocidad de 400 kt (741 Km/h).



Ilustración 1. U2 (izquierda), SR71 (centro) y Global Hawk (derecha)

Hoy en día, para las operaciones estratosféricas o suborbitales de larga duración, se tiene previsto emplear tres tipos de HAPS: por un lado, globos aerostáticos y dirigibles (p.e.: Aerostar, Sceye, Thales Alenia Stratobus) que generan la sustentación por flotabilidad (LTA, Lighter than air); y por otro, aeronaves de ala fija con gran superficie alar (envergadura y alargamiento muy pronunciados) y extradós recubierto con placas solares (HTA, Heavier than air) (p.e.: AeroVironment, BAE PHASA-35, AALTO Zephyr, UAVOS Apus Duo, SPL, UAVOS ApusDuo).



Ilustración 2. Globo (izda.), dirigible (centro) y HAPS ala fija (dcha.)

Los HAPS utilizan el Sol como fuente de energía que les permite mantenerse en vuelo en la estratosfera durante largos periodos de tiempo. Para ello tienen que disponer de capacidad de almacenamiento de energía suficiente para las horas nocturnas en las que no hay aporte de energía solar, siendo este efecto más acusado en invierno. Además, los HAPS tienen que estar contruidos con materiales muy ligeros y resistentes que sean capaces de soportar altos niveles de radiación y ozono, temperaturas muy bajas (pueden llegar a los -90°C), y todo ello en un entorno con una densidad del aire muy baja (el 90% de la masa de aire atmosférico se encuentra por debajo de los 20 km), por lo que la sustentación en los HTA se alcanza con grandes superficies alares, y la flotabilidad en los LTA, con amplísimos volúmenes de gas embolsado (normalmente, helio).

Para poder enfrentarse a este reto han sido necesarios progresos tecnológicos desarrollados en los últimos 20 años, entre los que cabe citar: materiales polímeros impermeables, ligeros y resistentes, células fotovoltaicas ligeras y eficientes, baterías y motores eléctricos más eficientes, miniaturización de equipos, desarrollo de modelos meteorológicos más precisos, y finalmente, el avance de la IA (Inteligencia artificial) y el ML ("Machine learning", aprendizaje automático) que permite, entre otros, gestionar el consumo y suministro de energía. Todo ello ha hecho posible solventar las dificultades que presenta la operación de plataformas HAPS en las capas bajas de la estratosfera durante largos periodos de tiempo.

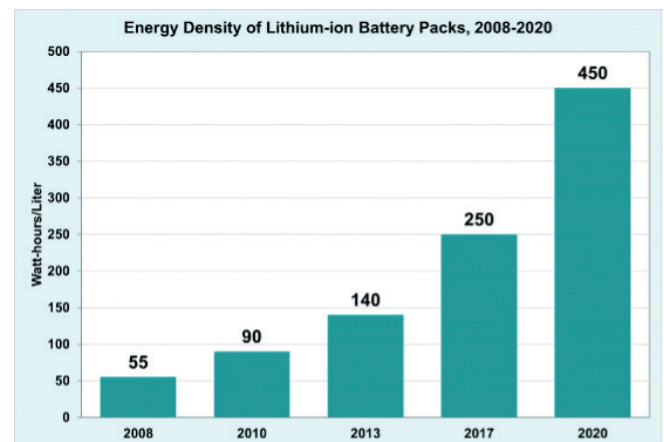


Ilustración 3. Evolución de la capacidad de almacenamiento de las baterías de Litio. [Fuente: U.S Department of Energy].

La tecnología HAPS presenta ventajas competitivas, tanto respecto a los satélites (menor coste de desarrollo y de explotación, menor latencia en las telecomunicaciones, mayor resolución de las imágenes, aunque a costa de tener una menor cobertura), como respecto a las redes terrestres (el alcance línea de vista nominal de un HAPS situado a 20 km de altura es de 500 km, mientras que una antena de 100 m de altura es de 36 km, casi 14 veces menos). Por todo ello, desde plataformas HAPS se pueden prestar un amplio número de servicios comerciales, militares e institucionales: conectividad, observación de la Tierra, gestión de desastres, defensa y seguridad, marítimos, vigilancia, monitorización y detección, inspección de infraestructuras críticas, cartográfica, misiones humanitarias, etc.

		Satellite for global coverage	Timer per orbit (Hours)	Time in site per gateway	Latency: RTT (ms)	Mass (Kg)	Lifetime (years)
Global Coverage	GEO	3	24	Always	600/700	~3500	15
	MEO	10-30	5-12	2-4 Hours	<150	~700	12
	LEO	100+	1.5	15 Minutes	<50	5-1000	<5-7
Spotted/Regional Coverage	HAPS	1 aircraft ~ 12 731 Km ² (70 Km radius assumed in this paper)		Always	<10	< 320 (Balloon) <100 (Aircraft)	> 5 (Balloon) > 8 (Aircraft)

Ilustración 4. Tabla comparativa de prestaciones Satélites vs HAPS. [Fuente: GSMA [8]].

El mercado de HAPS está progresando con un aumento constante de unidades en servicio, de 310 en 2019 (principalmente globos aerostáticos) a las 710 previstas para 2029 (LTA & HTA), creciendo a una tasa anual del 8,7 %. La tecnología HAPS está desarrollándose, generando nueva demanda de mercado y alterando el panorama actual, ofreciendo un nuevo potencial comercial para las empresas en el ecosistema HAPS. Para 2029, se espera que el mercado HAPS genere 4.000 M\$, impulsado por la demanda del mercado, una maduración de las tecnologías y un aumento de la financiación de agencias estatales e iniciativas empresariales. Para todo ello será necesario acelerar los desarrollos normativos.

En los últimos años se han puesto en marcha una serie de iniciativas para desarrollar y dar forma a las operaciones estratosféricas en el espacio aéreo superior (HAO):

- **Proyecto ECHO:** En Europa en el marco del programa SESAR busca desarrollar un concepto de operaciones para la gestión del espacio aéreo superior (HA, higher airspace), incluyendo principios de toma de decisiones colaborativa y conciencia situacional

cooperativa. Además, pretende establecer las bases para identificar los futuros roles operacionales, responsabilidades, procedimientos e infraestructuras necesarias para apoyar las HAO.

- **FAA y NASA:** Buscan asegurar una visión cooperativa del ETM (Gestión del Tráfico en el Espacio Aéreo Superior Clase E), alineada con los objetivos de la NASA que cumpla los requisitos para unas operaciones eficientes y seguras.
- **EASA:** Está desarrollando propuestas para estándares de certificación y requisitos operacionales específicos para HAPS.
- **JARUS** es un grupo de expertos internacionales provenientes de las Autoridades Nacionales de Aviación, EUROCONTROL y EASA. Su propósito es recomendar un conjunto de requisitos técnicos, de seguridad y operacionales para todos los aspectos vinculados a la operación segura de los UAS, que incluyen a las Plataformas HAPS.
- **HAPS Alliance:** Creada en 2020, es una asociación industrial integrada por diversas compañías e instituciones públicas. Trabaja para acelerar la adopción comercial de tecnologías HAPS mediante la promoción y desarrollo de estándares de la industria, directrices de interoperabilidad y políticas regulatorias.

2. AERONAVES HAPS

Como ya se ha indicado, los HAPS son generalmente clasificables en vehículos HTA y LTA. La madurez tecnológica actual, medida a través del indicador TRL (Technology Readiness Level) se considera más alto para la categoría HTA. Las tecnologías habilitadoras clave son la tecnología de baterías, las células solares y los materiales (resistentes y ligeros). Debido a las limitaciones de peso, el consumo de energía es crítico, especialmente durante la noche. Por lo tanto, permanecer a gran altitud es un desafío que a veces se hace imposible, dependiendo de la latitud y de la época del año. Esto se puede contrarrestar reduciendo significativamente la altitud durante la noche para reducir el consumo de energía. Sin embargo, algunas aplicaciones como las telecomunicaciones generalmente requieren un movimiento cuasi estacionario del HAPS para mantener la posición respecto a la Tierra. Los rigurosos requisitos de mantenimiento de la posición para ciertos tipos de operaciones pueden limitar la carga útil. En este sentido, los HAPS HTA generalmente ofrecen una mejor maniobrabilidad y son más resistentes al viento, pero soportan menor carga de pago.

Una característica única de los HAPS es su capacidad operativa de larga duración. Esto se ha demostrado en múltiples ocasiones y ya durante el vuelo inaugural del Airbus Zephyr, que duró casi 26 días a una altitud constante superior a los 18 km, con altitudes máximas superiores a 22 km. Recientemente ha batido su propio record de permanencia con 67 días en vuelo. Se prevé que las misiones LTA HAPS duren cientos de días en el futuro. La velocidad operativa de los vehículos es bastante baja, con velocidades máximas con respecto al aire comprendidas entre 10 y 15 m/s, para los LTA, y entre 20 y 35 m/s para los HTA.

Una característica importante de los HAPS HTA es su carga útil limitada. Así, por ejemplo, la del Zephyr es de 5 kg y se espera que aumente a 12 kg. El concepto de ala voladora solar en general puede ofrecer viabilidad hasta 30-40 kg de carga útil. Los HAPS LTA estándar ofrecen la ventaja de cargas útiles significativamente mayores, de 250 kg y más en el caso de Sceye y Thales Alenia Stratobus. El volumen de estos HAPS puede superar los 100.000 m³, con longitudes de hasta 150 m y diámetros de más de 30 m. El uso de vehículos LTA para cargas útiles inferiores a 200 kg infrutiliza la capacidad de portar carga de pago. Combinado con la limitación del concepto de HTA, se puede identificar un vacío de capacidades de carga útil, que puede llenarse con conceptos híbridos en el futuro.

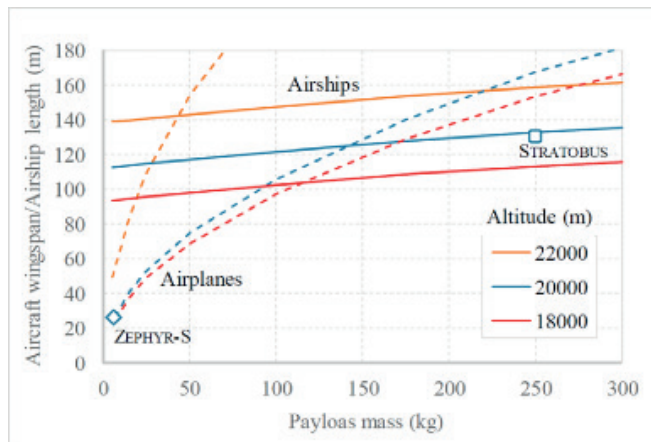


Ilustración 5. Dimensiones características de plataformas HAPS para diferentes cargas de pago y altitudes de misión [23].

La operación en la estratosfera presenta una serie de desafíos técnicos que deben ser superados para poder alcanzar la implantación operacional. Los principales obstáculos técnicos a los que se enfrentan los HAPS se resumen en la siguiente tabla.

Desafío		Clave
Condiciones ambientales	Bajas temperaturas	Baterías, motores y uniones adheridas.
		Materiales aislantes, técnicas de modelado térmico.
	Radiación solar	Sobrecalentamiento de componentes. Degradación de materiales externos.
Gestión energética	Eficiencia energética	Eficiencia de los paneles solares integrados (~30%). Capacidad de almacenaje de energía.
Aerodinámica	Eficiencia aerodinámica	Ala-fija: Ligeros y robustos. Globos: integridad estructural frente a cambios termodinámicos del He.
		Propulsión
Comunicaciones	Cobertura	Sistemas de comunicaciones avanzados y técnicas de retransmisión eficientes.

Ilustración 6. Desafíos del diseño del HAPS.

Las aeronaves HAPS tienen características muy diferentes dependiendo del tipo, si son LTA (aerostáticas, más ligeras que el aire) diferentes también si son globos o son dirigibles o HTA (aerodinámicas, más pesadas que el aire) de ala fija. Las aeronaves HAPS que operarán en el espacio aéreo superior (HAO) se presentan en la siguiente ilustración junto con la distribución en altura del ámbito de operación del resto de las aeronaves y satélites.

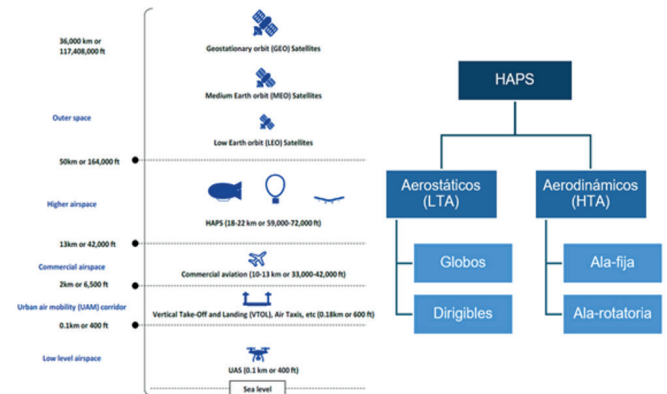


Ilustración 7. Distribución de los tipos de vehículos en altura [5].

Las LTA se mantienen en el aire gracias a la **flotabilidad**, que se obtiene mediante el uso de **gases más ligeros que el aire** (actualmente, helio; aunque tiene el doble de densidad que el hidrógeno, y es 5 veces más caro, es inerte, frente al carácter reactivo y explosivo del hidrógeno). Estas plataformas no requieren velocidad de avance para mantenerse en vuelo, solo necesitan energía para generar propulsión mediante motores eléctricos y hélices que neutralizan el efecto del viento y permiten mantener la posición, lo que da una mayor

eficiencia energética, períodos más largos de operación y cargas de pago mayores en comparación con las HTA.

Las HTA dependen de la **sustentación generada por la velocidad de avance al interactuar con la estructura alar** para permanecer en vuelo. Velocidades generalmente bajas aunque superiores a las de las LTA (75-120 km/h), que permiten maniobrabilidad sin agotar excesivamente la energía de la batería. Estas aeronaves utilizan energía solar o propulsión híbrida para sus operaciones de larga duración. Se distinguen dos subcategorías de aeronaves aerodinámicas: aeronaves de ala fija y aeronaves de ala rotatoria, estas últimas tienen de momento un rol secundario respecto a las de ala fija y no se abordan en el presente cuaderno.

2.1. Globos

Son el único tipo de vehículo de vuelo que puede operar en una región de la atmósfera que abarca desde los 15 km hasta los 45 km de altitud, que es demasiado baja para los satélites y demasiado alta para las aeronaves de ala fija. Las góndolas de carga útil suelen transportar experimentos científicos, así como sensores meteorológicos o de inteligencia. Al final de la misión, la carga útil se separa del globo y se recupera mediante paracaídas.

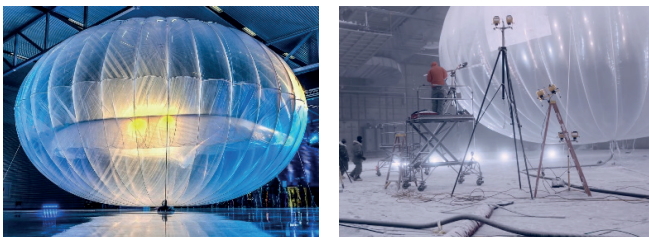


Ilustración 8. Pruebas de radiación (izda.) y baja temperatura (dcha.) del Proyecto Loon de Google.

El proyecto Loon desarrollado por Google se inició en 2011 para facilitar cobertura de comunicaciones e internet en zonas sin acceso a estos servicios. Se basaba en globos estratosféricos que llegaron a mantenerse en vuelo hasta 312 días a una altitud comprendida entre los 18 y los 23 km de altitud, con una cobertura de 40 km de radio. Los globos del Proyecto Loon viajaban por la estratosfera, donde generalmente los vientos son estables y moderados (de 8 a 32 km/h), y además hay un perfil de viento en altura, tanto en intensidad como en dirección. Algoritmos de software permitían determinar la altitud a la que dirigir el globo para que los vientos lo arrastraran hacia la zona de prestación del servicio de comunicaciones. El proyecto se concluyó en 2021 debido a las dificultades financieras y regulatorias.



Ilustración 9. Globo del Proyecto Loon de Google.

Por lo general, los globos diseñados para volar en la estratosfera superior y en el borde del espacio se dividen en dos tipos principales: globos de presión cero y globos de superpresión. Ambos tipos utilizan gas helio para flotar.

Los globos estratosféricos de presión cero tienen válvulas de liberación que permiten que la presión dentro del globo permanezca igual que la del exterior. Estos globos continuarán elevándose hasta que encuentren la altitud de flotabilidad, que por interacción termodinámica, variará a lo largo del día, y sobre todo, por el enfriamiento nocturno, aunque puede regularse soltando lastre durante la noche; potencialmente, pueden permanecer en el aire durante semanas.

Los globos de superpresión están completamente sellados y mantienen una presión más alta dentro del globo, lo que le permite mantener su altitud operativa durante meses a pesar de los cambios de temperatura que ocurren durante el día y la noche. Los globos de superpresión se lanzan parcialmente llenos de helio y, a medida que el globo asciende y la presión del aire ambiental disminuye, el helio se expande para llenar la envoltura y alcanzar la altitud de flotación deseada. En cuanto a la operación en tierra, los globos tienen pocas instalaciones permanentes. Generalmente, el lanzamiento de los globos más grandes se realiza desde ubicaciones remotas para evitar incidentes de aterrizaje durante la recuperación.

La altitud de operación de los globos permite, idealmente, una cobertura de hasta 240 km de diámetro para servicios de telecomunicaciones. Además, tienen bajo coste de fabricación y operación y pueden permanecer operando en la estratosfera durante varios meses en condiciones de viento moderado y mínima turbulencia.

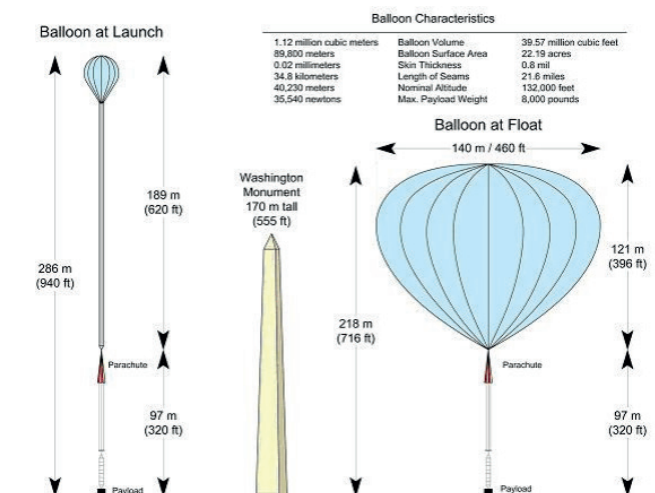


Ilustración 10. Esquema de globo de presión cero (ZPB). [Fuente. NASA].

La NASA está desarrollando el Super Pressure Balloon (SPB) para misiones en principio científicas, con capacidad para transportar una carga de pago de 1 tonelada, manteniéndose a una altitud de 110.000 ft (33,5 km) con variaciones de ± 5.000 ft (1.500 m), y con una permanencia de 100 días.

2.2. Dirigibles

Los grandes dirigibles, aeronaves tripuladas a bordo más ligeras que el aire (LTA) con capacidad de mando y control, pero con cabinas no presurizadas y altitudes de operación de apenas 1000 ft, se desarrollaron al final del siglo XIX y tuvieron una corta historia en la que demostraron interesantes posibilidades prácticas. Como apuntaba L. Konstantinov en su magistral 'The Basic of Gas and Heat Airship Theory', estos 'dinosaurios del aire', con longitudes superiores a dos campos de fútbol y con capacidad de transportar toneladas de carga a miles de kilómetros, terminaron su existencia a finales de los años treinta del siglo pasado. Al igual que sus 'hermanos biológicos', que murieron y sólo pequeños reptiles sobrevivieron, a lo largo del siglo XX se desarrollaron pequeños dirigibles que operaban a baja altitud con significativas carencias operativas, estructurales y funcionales. Sin embargo, en los últimos años la tecnología de las energías renovables y de los materiales han progresado hasta el punto de permitir que los dirigibles permanezcan en vuelo durante meses.

Los dirigibles, a diferencia de los aviones que generan sustentación mediante fuerzas aerodinámicas, consiguen la sustentación mediante flotabilidad y no necesitan permanecer en movimiento para generar la fuerza ascendente que neutralice la acción de la gravedad. Esta

característica, y la posibilidad de mantenerse en vuelo a punto fijo en la estratosfera les hace candidatos ideales para prestar servicios de conectividad, de captura de imágenes o de vigilancia dentro de la región de cobertura.



Ilustración 11. Graf Zeppelin sobrevolando Madrid (1932).

Para cualquier HAPS que pretenda permanecer en vuelo durante largos periodos de tiempo, es necesario hacer una gestión eficaz de la energía solar para todas sus operaciones de vuelo, climatización (enfriamiento/calentamiento) y alimentación a la carga de pago, almacenando energía durante el día en baterías, y consumiéndola durante la noche. Este balance energético está influenciado por una serie de factores como altitud de vuelo, latitud y longitud, época del año (todo ello condiciona los vientos, temperaturas, radiación solar, etc), características aerodinámicas y propulsoras, y las capacidades y eficiencias del sistema de energía.



Ilustración 12. Lanzamiento en vuelo de pruebas del HAPS LTA de la compañía Scye desde Roswell (New Mexico). [cortesía de la compañía Scye]

Un ejemplo de dirigible en fase de desarrollo es el Stratobus, como uno de los demostradores del proyecto EUROHAPS de la European Defence Foundation por la empresa Thales Alenia Space. Está previsto que sea un dirigible autónomo de 9.000 kg, con una carga de pago de 250 kg y una longitud de 140 m, propulsado por 4 motores eléctricos que le permitan neutralizar vientos de hasta 90 km/h (25 m/s), y que obtenga la energía mediante paneles solares que le permitan permanecer durante 1 año a una altitud de 18 a 20 km, lo que le daría un horizonte línea de vista teórico de 500 km.

2.3. HAPS HTA

El progreso en el diseño estructural y la construcción ultraligera, la tecnología de baterías y los dispositivos solares han impulsado la investigación y el desarrollo de los HAPS HTA desde finales de los años 90. Algunos de los programas más destacados relacionados con los HAPS HTA son el programa ERAST de la NASA, que produce una gran cantidad de aeronaves, incluida la aeronave Helios, que ostenta el récord de altitud actual entre los HAPS, de 96.863 pies (28.600 m.); el programa Solar Impulse, que realizó un vuelo tripulado completamente propulsado por energía solar alrededor del mundo, cubriendo una distancia de alrededor de 26.718 millas (casi 50.000 Km) en 2016; y el programa Zephyr de Airbus, que incluye al Zephyr S, que recientemente rompió su propio récord de resistencia entre los HAPS de casi 26 días en 2018, con un vuelo continuo de 67 días realizado en 2025.

El diseño y el funcionamiento de los HAPS HTA son una tarea compleja, como lo demuestra la gran cantidad de proyectos que finalmente se cancelan en la fase de desarrollo. Como ejemplo se puede mencionar el proyecto ODYSSEUS de Boeing, una aeronave autónoma de 49 metros de envergadura con capacidad de despegar por partes y acoplarse en vuelo para formar un único HAPS HTA, con el objetivo de mantenerse en la estratosfera durante meses transportando una carga de pago de 70 kg.



Helios NASA

Odysseus BOEING

Ilustración 13. Ejemplos de HAPS HTA.

En el caso de los aviones de ala fija, el objetivo de una baja resistencia requiere un peso muy bajo y un alargamiento muy alto para lograr una alta eficiencia aerodinámica. Al mismo tiempo, las baterías necesarias para almacenar suficiente energía para mantener una altitud mínima durante la noche suponen una considerable penalización de peso para la carga de pago. Todos estos factores imponen una estructura ultraligera que da lugar a un avión muy flexible. El ala se podría diseñar para que sea muy elástica como se muestra en las fotografías del Helios de la NASA. Se podrían conseguir grandes envergaduras con poco peso distribuyendo las masas individuales (por ejemplo, los motores) a lo largo del ala; cada sección del ala soporta una parte del peso total.

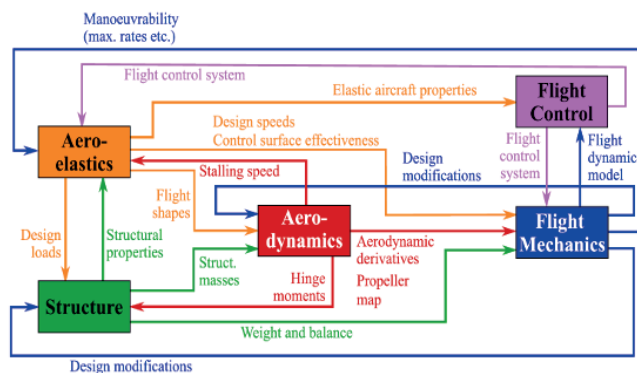


Ilustración 14. Esquema del proceso de diseño de HAPS HTA [21]

Otro problema es la gran envolvente de vuelo con respecto a la altitud que va desde el nivel del mar hasta la estratosfera inferior en combinación con la ausencia de un sistema de hipersustentación debido a las restricciones de peso del avión. Como consecuencia, el rango de velocidad permitido es muy pequeño. Para no tener que terminar el vuelo inmediatamente, si la comunicación entre el segmento terrestre y el avión se interrumpe durante un par de segundos y para ahorrar energía de control, el diseño del HAPS tiene que ser intrínsecamente estable. Como el avión opera sin tripulación y más allá de la línea de visión, necesita estar equipado con un sistema de terminación, lo que supone otra penalización de peso adicional.



Ilustración 15. BAE Systems PHASA-35 (izda.) y UAVOS ApusDuo (dcha.)

El sistema HAPS incluye la aeronave en sí y el sistema de control de vuelo. Ya hay un gran número de programas en

todo el mundo que se centran en el diseño y operación de aeronaves HAPS HTA. El Airbus Zephyr, el BAE Systems PHASA-35 o el UAVOS ApusDuo son solo algunos ejemplos destacados de aeronaves que también ya realizaron vuelos con éxito.

3. CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE LAS HAO

A lo largo del vuelo, los HAPS tienen que interactuar con condiciones ambientales muy diferentes: por un lado, en la troposfera (durante el lanzamiento, hasta alcanzar la altura de operación, y posteriormente, en el retorno, hasta el aterrizaje o la recuperación); y por otro, en la estratosfera, donde permanecen durante largos periodos de tiempo.

En la atmósfera, la mayoría de los fenómenos meteorológicos tienen lugar en la troposfera, que, dependiendo de la localización geográfica y la estación del año, tiene una altura aproximada de 10 km. El clima en la troposfera es diverso y cambiante, y está permanentemente monitorizado, disponiéndose de información meteorológica completa y actualizada.

Por encima de la troposfera se encuentra la estratosfera (aproximadamente 10-50 km de altitud), donde ya no se dan fenómenos meteorológicos como la formación de nubes o tormentas, caracterizando su estado básicamente una densidad del aire muy baja, un perfil de temperatura creciente con la altitud y perfil de vientos en altura. Sin embargo, el conocimiento de estos datos es escaso y disperso ya que los sistemas de observación meteorológicos tradicionales (p.e.: radiosondas, estaciones LIDAR y RADAR terrestres), se han venido centrando en la captura de datos de la troposfera que ha sido el entorno de operación habitual de la aviación comercial.

A diferencia de lo que ocurre en la troposfera donde la temperatura del aire desciende con la altura a razón de 6.5°C cada kilómetro (atmósfera estándar), en la estratosfera se produce un fenómeno de **inversión térmica**; la temperatura aumenta con la altitud debido principalmente a la absorción de la radiación ultravioleta del sol por la capa de ozono, que transforma la radiación en calor.

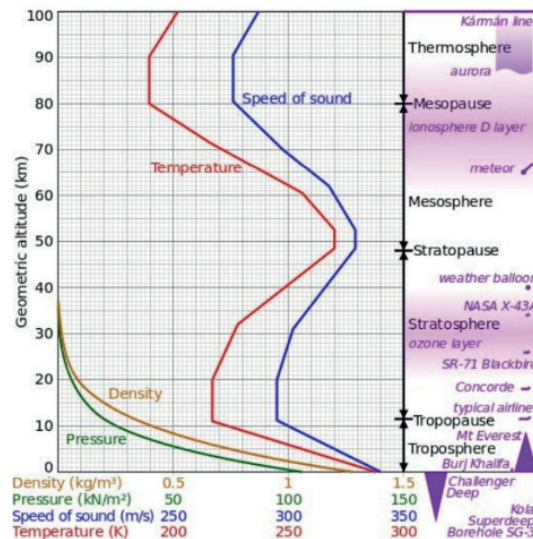


Ilustración 16. Evolución de la temperatura, densidad y presión atmosférica con la altitud.

Adicionalmente, la **baja densidad del aire** en la estratosfera reduce significativamente la resistencia aerodinámica, permitiendo que las aeronaves operen a mayores velocidades y con menor consumo de combustible. No obstante, la baja densidad del aire exige adaptar el diseño de las aeronaves para permitir que generen suficiente sustentación (en los HTA, incrementando la velocidad y/o la superficie alar; en los LTA, con volúmenes de gas embolsado mayores), contrarrestando así, la baja presión atmosférica.

Los **vientos estratosféricos** cambian con la altitud (presentan un mínimo entre 20 km y 25 km de altitud), con la época del año (componente predominantemente oeste en los meses de invierno, y de componente este en los meses de verano) y con la latitud. Además, en la estratosfera se produce otro fenómeno conocido como vórtice polar, que es una franja de fuertes vientos de componente oeste formada en latitudes cercanas al Polo Norte en invierno y a una altura de entre 20 y 40 km.

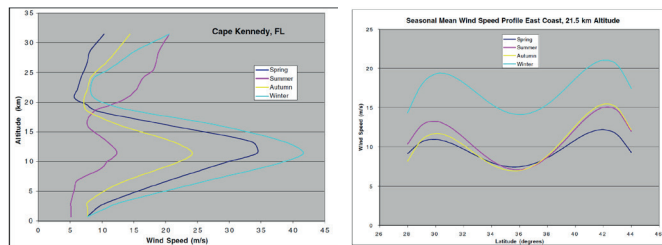


Ilustración 17. Perfil de viento en altura en Cabo Kennedy (Izda.) y Costa Este de EE.UU. (dcha.) [4].

La gestión del tránsito de vehículos espaciales a través de la estratosfera, o la integración de operaciones suborbitales como las HAO, son difíciles de gestionar mediante los medios tradicionales de ATM, penalizando la capacidad del espacio aéreo. A corto y medio plazo, se pueden realizar operaciones utilizando espacios aéreos segregados para ascender y descender.

Los dos límites del HA –en el extremo inferior, hacia el techo de los espacios aéreos controlados por el *Air Traffic Management* (ATM), y en el extremo superior, hacia el espacio exterior gestionado por el *Space Traffic Management* (STM)– exigen interfaces tanto con los servicios ATM como con los STM. El suministro de datos necesario para las interfaces con los servicios STM y ATM podría facilitarse mediante servicios de información globales como el Sistema SWIM (*System Wide Information Management*). La integración de los principios ATM y STM podría permitir operaciones con una intervención táctica limitada tras un enfoque de separación estratégica reforzada. Junto a todo ello, es necesario un interfaz civil-militar para la coordinación de las operaciones, ya que las operaciones militares son hoy una de las pocas operaciones rutinarias dentro de los límites del HA.

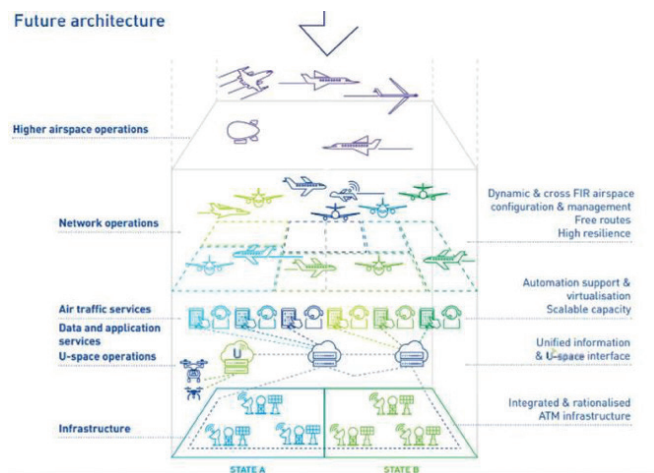


Ilustración 20. Visión del futuro ATM (European ATM Master Plan).

4.2. Separación Estratégica

El sistema actual de gestión del tráfico ATM tiene varios niveles con el objetivo de alcanzar altos niveles de seguridad de las operaciones y permiten un uso eficiente del espacio aéreo. Estos niveles incluyen: 1) gestión estratégica con resolución de conflictos en la fase de planificación; 2) provisión de separación (táctica); y 3) resolución de colisiones (último recurso). La eliminación de conflictos entre trayectorias en la fase estratégica se considera el mecanismo principal para gestionar el tráfico HAO. La mayoría de los vehículos no

estarán tripulados y tendrán maniobrabilidad reducida y un equipamiento limitado a bordo debido a las restricciones de peso. Por lo tanto, la compatibilidad de las operaciones tendrá que fijarse en la fase estratégica, limitando la prevención de colisiones tácticas y de último recurso a situaciones de contingencia o emergencia.

4.3. Gestión Cooperativa

Será necesaria una gestión cooperativa basada en la planificación de rutas sin conflictos, complementada con un seguimiento táctico. La toma de decisiones dentro del espacio aéreo gestionado cooperativamente se basará en reglas operacionales aceptadas de común acuerdo y en la provisión de conocimiento de la situación y apoyo a la toma de decisiones. Este concepto basado en la gestión cooperativa de flotas, implementado de manera adecuada, se basaría en interfaces tanto con el ATM como con el STM, porque también se deben tener en cuenta los vehículos espaciales que ascienden, descienden y transitan a través del espacio aéreo hacia/desde el espacio exterior. En el contexto de las operaciones de globos y aeronaves no tripuladas, la FAA afirma que en la clase E superior (término para HA en los EEUU), los servicios de separación de los proveedores de servicios de navegación aérea no son deseables, apropiados ni disponibles, por lo que se establecerá un sistema de gestión cooperativa de operaciones basado en la comunidad, guiado por las reglas establecidas por el regulador. Esta separación cooperativa se logra a través de la intención compartida, la conciencia, la eliminación de conflictos en las operaciones, la monitorización de la conformidad, las tecnologías que respaldan la toma de decisiones y la eliminación de conflictos, y el establecimiento de reglas y procedimientos aplicables.

4.4. Trajectory-Based Operations (TBO)

Desde el lanzamiento en superficie, hasta que alcanza su altura de operación, los HAPS tienen que atravesar el espacio aéreo utilizado habitualmente por la aviación civil y militar, por lo que se hace necesario implantar mecanismos de coordinación para que las trayectorias voladas estén libres de conflicto con otros tráficos. Para ello, se tiene previsto utilizar procedimientos operativos, equivalentes a los utilizados actualmente por el sistema ATM que responden a las fases: estratégica, pre-táctica y táctica.

Debido a las incertidumbres de las posiciones de los vehículos HAPS a lo largo del tiempo, se pueden utilizar las denominadas zonas operativas 4D, que determinan dónde puede operar un determinado vehículo. En función de las prestaciones y la misión, la forma 4D y su volumen pueden cambiar durante la operación. Este concepto se basa en el

enfoque de trayectorias 4D que se está desarrollando tanto en SESAR (Europa) como en NextGen (EEUU).

Las zonas operativas 4D son utilizadas por vehículos con niveles altos de incertidumbre en sus trayectorias de vuelo (por ejemplo, la zona operativa de un HAPS cuasi-estacionario para cumplir su misión sobre un área de interés) que comparten sus datos de vuelo en tiempo real. Una zona operativa 4D puede, por tanto, ser equivalente a una reserva dinámica de espacio aéreo centrada en el vehículo con dimensiones laterales/verticales definidas, descrita como un volumen 4D de espacio aéreo que se mueve a lo largo de un perfil de trayectoria. Dentro de la zona DMA (Dynamic Mobile Areas, término con el que se identifican en el proyecto SESAR) puede haber uno o varios HAPS.

La separación entre los HAPS y el resto del tráfico en el espacio aéreo controlado es suministrada por los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP por sus siglas en inglés), mientras que la separación entre vehículos dentro de una zona operativa 4D pueden ser proporcionados por proveedores de servicios de separación específicos. Fuera del espacio aéreo controlado, se aplican una combinación de medidas estratégicas de resolución de conflictos, gestión cooperativa del tráfico y capacidad de auto-separación. Para todo ello es fundamental el conocimiento actualizado de las trayectorias 4D previstas, de las prestaciones de la aeronave (p.e.: capacidad de mando y control, capacidad para detectar y evitar otros tráficos, sistemas de navegación/comunicación/vigilancia a bordo), y de las condiciones meteorológicas.

Antes de operar un vuelo HAPS, el operador debe completar un plan de vuelo en el que especifique el lugar/día/hora previstos para el lanzamiento, la trayectoria 4D, la zona de operación, lugar/día/hora previstos para la recuperación, y cualquier información adicional relevante para la evolución segura del vuelo. Este plan de vuelo debe incorporarse en el sistema ATM en red para analizar la compatibilidad con otros vuelos que tengan intención de evolucionar en las proximidades, y las medidas de separación a aplicar por el ANSP (p.e.: segregación, trayectoria 4D) mientras se encuentre en el espacio aéreo ATS bajo su responsabilidad. Verificado que la trayectoria propuesta está libre de conflictos con otros vuelos, se genera la autorización a la operación. En otro caso, se entra en un proceso centralizado de negociación en red (CDM, Collaborative Decisión Making) hasta identificar una solución de compromiso libre de conflictos.

Por lo tanto, el operador debe obtener una autorización al plan de vuelo antes de iniciar la operación y el desarrollo de esta debe ajustarse a lo especificado en el plan. Si las condiciones

operativas o de contorno (p.e.: presencia de otros tráficos, meteorología adversa) aconsejan modificar lo indicado en el plan de vuelo, se modificará éste para informar al sistema en red del cambio. En caso de producirse una emergencia, se activarán los procedimientos correspondientes que previamente habrá definido el operador del HAPS.

Cuando no es posible eliminar los conflictos de forma estratégica, la separación se tiene que alcanzar de forma táctica: o bien el operador HAPS tiene la capacidad de separarse de otros tráficos, o bien el ANSP le suministra servicio de control para separarlo dentro del espacio aéreo de su responsabilidad. Si tiene lugar en la estratosfera, el servicio puede ser suministrado por un proveedor HAOSP (High Airspace Operations Service Provider).

Dentro de la zona reservada para operaciones HAO (p.e.: HAPS, vehículos de baja velocidad que son capaces de separarse por sí mismos), se pueden utilizar soluciones para evitar colisiones utilizando inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático (ML) u otras tecnologías que utilizan el intercambio de información actualizada para permitir operaciones seguras dentro del espacio aéreo reservado. Una vez que se ha establecido el volumen de protección, la organización y gestión de las operaciones dentro de él es responsabilidad de la entidad acordada a través del proceso de planificación. El operador HAPS designado tiene la responsabilidad de mantener las operaciones dentro de la zona operativa 4D a lo largo del tiempo y de proporcionar la información a todas las partes interesadas. La responsabilidad de la gestión de la separación y la prevención de colisiones está claramente asignada a un actor específico en función de las capacidades individuales de los vehículos y del espacio aéreo en el que se encuentra.

El límite inferior de las HAO no se define necesariamente como un nivel fijo en todo el espacio aéreo. Además, algunos vehículos HAPS pueden operar en niveles de vuelo donde también lo hace cierto tipo de aeronaves comerciales. Por ejemplo, los perfiles de trayectoria nominal HAPS podrían bajar temporalmente hasta 55.000 ft durante la noche si las baterías están descargadas y los paneles solares no reciben energía hasta la salida del sol. Por otro lado, las aeronaves de aviación ejecutiva de altas prestaciones o los vuelos supersónicos pueden alcanzar altitudes superiores a los 55.000 ft (aunque no se les considera propiamente HAO). Los HAPS que necesitan operar en los niveles inferiores de la estratosfera requieren el establecimiento de una zona operativa 4D, mientras que el tráfico aéreo comercial que pudiera volar en las proximidades se mantiene convenientemente alejado por rutas alternativas para garantizar la separación.

Para poder gestionar una cantidad tan ingente de información actualizada de cobertura mundial que permita la gestión de trayectorias, el proceso de coordinación y el suministro de información necesaria para supervisar, revisar y actualizar la planificación de los vuelos, es necesario que los sistemas estén conectados, sean interoperables y que utilicen formatos de comunicación normalizados, preferiblemente digitales, que alimenten el Sistema SWIM (System Wide Information Management), responsable a nivel mundial del intercambio de información de intenciones actualizadas de los operadores y de la configuración y limitaciones del espacio aéreo.

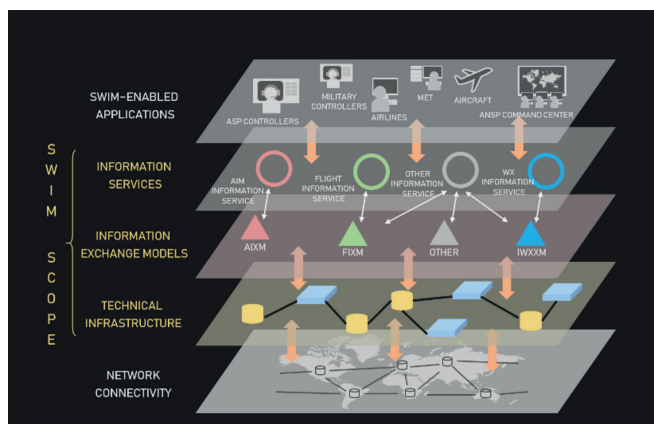


Ilustración 21. Esquema del sistema SWIM [Fuente: EUROCONTROL].

4.5. Coordinación Civil-Militar

Al igual que ocurre en la troposfera, en la que el uso del espacio aéreo tiene que ser compartido por operadores civiles y aviación militar, en la estratosfera es necesario compatibilizar ambas actividades, en las que nuevamente la Defensa y Seguridad son una prioridad para los Estados, pero en la que hay que dar cabida también a un sector estratégico como el Transporte Aéreo.

Dada la naturaleza de las operaciones militares, los requisitos de las misiones pueden variar con el tipo de misión y las características de vuelo. Al igual que ocurre en el espacio aéreo ATS, por razones de seguridad, algunas misiones militares tienen carácter reservado, lo que supone que el intercambio de información es limitado, pero en cualquier caso alcanza un nivel suficiente para permitir un conocimiento adecuado de la situación que garantice la seguridad en vuelo. Todo ello permite la continuidad de la colaboración (en los procesos de planificación a largo plazo), la cooperación (con soluciones adoptadas en la fase pre-táctica) y la coordinación (en tiempo real para adoptar medidas tácticas) civil-militar para garantizar la compatibilidad de las operaciones.

Para las fases pre-táctica y táctica, también se utilizan procesos de toma de decisiones colaborativa (CDM) como un mecanismo de cooperación y coordinación civil-militar que permite la adopción de soluciones adecuadas en la fase de planificación y en la toma de decisiones tácticas conjuntas en la fase de ejecución, teniendo en cuenta las necesidades, preferencias y prioridades de las partes civiles y militares involucradas.

4.6. Gestión de Flotas HAPS

Si bien los HAPS pueden operar como vehículos individuales, en muchos casos se organizarán y desplegarán como una flota que debe considerarse como una infraestructura aerotransportada [14]. A escala global, la densidad de HAPS en el cielo puede no ser muy alta en los próximos años, pero a nivel regional y local, las flotas de HAPS pueden crear operaciones de alta densidad.

Los HAPS pueden ser sistemas interconectados en los que el comportamiento de los vehículos puede depender uno del otro. La optimización de la operación es un proceso complejo que demanda, entre otras, una gestión de la energía (que a su vez depende de muchos factores externos, como el clima y la demanda de servicios) y su comportamiento puede ser sensible a parámetros que no se pueden pronosticar con gran precisión (como el clima). Como resultado, los sistemas HAPS serán muy dinámicos: replanificándose y ajustándose constantemente a las condiciones de contorno para intentar mantenerse en el punto óptimo de operación.

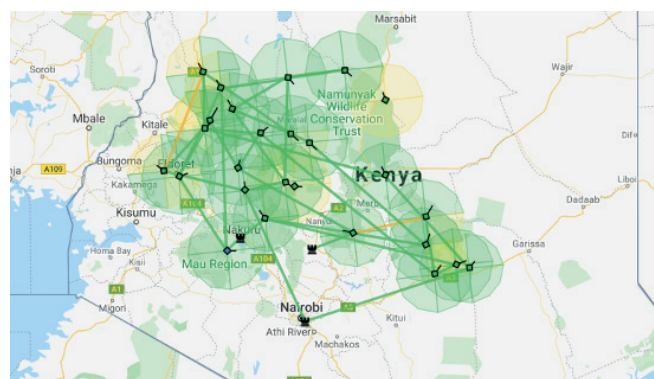


Ilustración 22. Ejemplo de flota de HAPS operando sobre Kenia [Fuente: HAPS Alliance].

Los operadores pueden estar cumpliendo múltiples misiones con un número limitado de vehículos aéreos. Como resultado, la gestión de la flota también puede cambiar dinámicamente y reasignar misiones a vehículos individuales para maximizar el uso de los activos aéreos. En muchos casos, los vehículos

serán en su mayoría intercambiables. Algunos sistemas HAPS estarán compuestos por tipos de vehículos y rendimientos mixtos (p.ej., dirigibles y alas fijas).

La gestión de la flota puede ser una tarea compleja y estratégica que necesita tener en cuenta los estados actuales y esperados y las condiciones ambientales de los múltiples vehículos. A menudo se realizará mediante una sofisticada automatización de la gestión y despacho de flotas, asistida por la IA, y en última instancia, por personal operativo.

Las flotas de HAPS de ala fija volarán en patrones circulares, elípticos, helicoidales, en forma de 8 o no estacionarios (por ejemplo, patrones de búsqueda/exploración), explorando un rango de altitud siguiendo un ciclo diurno. Es posible que ajusten con frecuencia sus “trayectorias orbitales”, la posición del objetivo y la altitud para responder a la optimización de la gestión de la red y las condiciones ambientales. Si la capacidad de mantenimiento de la posición del HAPS no es suficiente para la misión deseada (p.ej., suficiente propulsión lateral para vencer el viento), las flotas pueden organizarse en un gran flujo rotatorio de modo que se asegure una cobertura continua en tierra a pesar del movimiento constante de los vehículos en el cielo.

Al considerar la gestión de las operaciones, es importante tener en cuenta que el control de un vehículo no puede considerarse independientemente de otros vehículos, ya que la navegación y las decisiones tomadas para un vehículo pueden afectar las decisiones de navegación de otras plataformas. Para garantizar operaciones seguras será necesario alejarse del modelo tradicional de piloto-vehículo y evolucionar hacia un enfoque de gestión de sistemas más holístico.



Ilustración 23. Esquema de operación internacional de HAPS de varios operadores [Fuente: HAPS Alliance].

La mayoría de las HAPS suelen (pero no necesariamente) lanzarse desde un número limitado de instalaciones de lanzamiento fijas (elementos de lanzamiento y recuperación,

sitios de lanzamiento o estratopuertos) que a menudo comprenden infraestructura específica y están ubicadas estratégicamente en todo el mundo en lugares que optimizan las condiciones de lanzamiento y recuperación (condiciones climáticas óptimas, alejadas de la población y de los centros/rutas de tráfico aéreo concurridos) y la reducción del tiempo de tránsito promedio a las regiones de prestación del servicio. Una vez en altitud, los HAPS pueden viajar desde su lugar de lanzamiento hasta sus destinos de misión, que pueden estar ubicados por todo el mundo. La mayoría de los HAPS permanecerán en el aire entre misiones: al completar una misión (que puede ser de corta o larga duración), un vehículo puede ser asignado a otra misión que puede estar en otra región del mundo, o el vehículo puede ser dirigido a una región de espera (análoga a un ‘estacionamiento aéreo’) donde los vehículos se mantienen en el aire, en espera antes de ser asignados a otra misión.

En algunos casos donde las flotas están organizadas en rotaciones de flujo regional, cada vehículo puede estar realizando un bucle entre una serie de misiones. Por ejemplo, una flota puede estar organizada en un grupo supra-regional que rota entre misiones de conectividad entre países. Esto puede hacerse para aprovechar las corrientes de viento dominantes y minimizar la energía utilizada para fines de navegación, de modo que pueda asignarse a las necesidades de la misión (por ejemplo, comunicación).

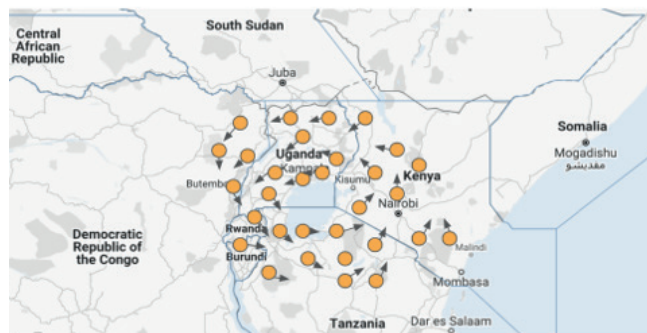


Ilustración 24. Esquema de operación transfronteriza conjunta con reubicación dinámica de flotas [Fuente: HAPS Alliance].

Al final de la vida útil de un vehículo, o cuando un vehículo necesite mantenimiento, se le dirigirá a un lugar de recuperación (que puede ser el mismo que el lugar de lanzamiento). Al igual que las instalaciones de lanzamiento, las instalaciones de recuperación son, para la mayoría de las operaciones, comparativamente menores en número que las regiones de servicio. Estarán ubicadas estratégicamente en todo el mundo para optimizar las condiciones de recuperación favorables y para ser más eficientes en el servicio de las necesidades operativas. Algunas operaciones establecerán

acuerdos de retorno y rescate análogos a la recuperación de objetos espaciales para emergencias o aterrizajes no planificados.

4.7. Disponibilidad de Sistemas CNS

Los tres componentes principales del Sistema ATM que dan soporte para la gestión de las operaciones son los sistemas de **Comunicación, Navegación y Vigilancia (CNS)**. En las últimas décadas se han introducido gradualmente sistemas ATM con mayores niveles de digitalización y automatización que respaldan el control humano. Para las operaciones HAO está previsto aplicar tecnologías que ya se han utilizado ampliamente para los UAS. Por encima del FL600, el espacio aéreo puede servir como banco de pruebas para nuevas tecnologías CNS, que a largo plazo podrían crear oportunidades para facilitar la integración en el espacio aéreo inferior.

La principal forma de **comunicación** aire-tierra ha venido siendo el uso de transmisión de voz VHF (y HF sobre áreas remotas u oceánicas), que es previsible que continúe en el futuro. Además, cada vez se utiliza más el enlace de datos y se extenderá aún más en el futuro, llegando a reemplazar las comunicaciones de voz como el principal medio de comunicación a largo plazo.

Las comunicaciones de voz se seguirán proporcionando para intervenciones tácticas y comunicaciones no rutinarias. En el caso de vehículos no tripulados como los HAPS, también se utilizarán comunicaciones tierra-tierra. El entorno del espacio aéreo superior con usuarios tanto del espacio aéreo como del espacio exterior y nuevos operadores no tradicionales puede plantear desafíos debido a las diferentes políticas de comunicación y, especialmente, en relación con la designación de bandas de frecuencia.

Los **sistemas de navegación** proporcionan los datos necesarios para que los equipos de a bordo calculen una posición de la aeronave. El posicionamiento puede ser proporcionado por ayudas a la navegación terrestres (p.ej., DME) o espaciales (p.ej., GPS) o sistemas autónomos (p.ej., INS). No todas las ayudas a la navegación terrestres son adecuadas para las operaciones HAO.

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) consta de una o más constelaciones centrales junto con un conjunto de posibles ampliaciones. Es un sistema mundial de determinación de la posición y el tiempo que incluye una o más constelaciones de satélites, receptores y estaciones de monitorización de la integridad del sistema. Los vehículos que operan hacia, desde y dentro de la estratosfera deben tener

las precisiones de navegación lateral y vertical requeridas, con la integridad y continuidad apropiadas, acorde con la operación planificada.

El GNSS también podría utilizarse para determinar la altitud; sin embargo, actualmente se exige que solo se utilice **altimetría** de presión para las operaciones. La mayoría de los altímetros de presión comerciales están certificados para volar hasta altitudes comprendidas entre 50.000 ft y 60.000 ft por lo que pueden no proporcionar información útil de altitud barométrica en el espacio aéreo HAO. Las discrepancias entre la altimetría GNSS y la barométrica puede llegar a miles de pies y tiene que ver con la diferencia de referencias (MSL en el baro altímetro; y el elipsoide WGS84, en el GNSS) y factores como gradientes de presión. Por lo tanto, será necesario establecer nuevos procedimientos altimétricos para medir la referencia vertical de los HAPS cuando operen en la estratosfera.

Los **estándares de separación** entre aeronaves han evolucionado y la separación se puede reducir en ciertas condiciones (por ejemplo, operaciones RVSM) utilizando tecnologías más avanzadas y probadas, aunque por el momento no se extienden a las HAO. Los estándares de separación militar por encima de FL600, que son los únicos estándares establecidos que existen para estas altitudes, datan de tiempos anteriores a la existencia del GPS y, por lo tanto, se basan en parte en estimaciones sobre las limitaciones del radar y la precisión de navegación degradada (5000 pies verticales, 10 millas de separación lateral).

Según la OACI, los **sistemas de vigilancia** aeronáutica proporcionan la posición y otra información relacionada tanto al ATM como a otros usuarios. Los sistemas de vigilancia en general se pueden clasificar en tres categorías, según cómo se reciben y procesan las señales. El radar de vigilancia primaria (PSR) es el único sistema de vigilancia independiente no cooperativo. Actualmente se complementa con el radar de vigilancia secundaria (SSR), que se clasifica como cooperativo independiente. La vigilancia cooperativa dependiente es la tercera categoría, siendo la vigilancia dependiente automática por radiodifusión (ADS-B) el ejemplo más común. Independiente o dependiente se refiere a cómo se mide la posición: dependiente significa determinación a bordo, mientras que independiente se refiere a determinación en tierra. Cooperativo o no cooperativo se refiere al equipo de la aeronave, que es necesario para la vigilancia (cooperativo) o no es necesario (no cooperativo).

Si se pone el foco ahora en las operaciones en el espacio aéreo superior, los sistemas por satélite volverán a ser

clave. Mientras que los radares primarios y secundarios actuales ubicados en la superficie terrestre no parecen ser muy efectivos para realizar un seguimiento del tráfico en el espacio aéreo superior, el ADS-B se erige como el principal sistema para localizar el tráfico. Especialmente interesante parece el ADS-B basado en el espacio ya que, mientras que con la infraestructura terrestre actual solo se cubre en torno al 30% de todo el espacio aéreo, colocando antenas y transpondedores necesarios en los satélites receptores de ADS-B se podría tener una cobertura global de ADS-B en todo el espacio aéreo superior. Con este sistema solo podrá ser identificado el tráfico cooperativo, por lo que será necesario incorporar técnicas de detección de tráfico no cooperativo para realizar un seguimiento completo del espacio aéreo superior.

Otros sistemas utilizados para la detección de aeronaves son las llamadas redes de seguridad, de las que se diferencian dos tipos: las basadas en tierra, que proporcionan ayuda a los controladores para identificar y resolver conflictos potenciales entre aeronaves, y las basadas en la aeronave que ayudan al operador de la misma. En este último sentido, destaca el sistema de evasión de colisiones (TCAS, Traffic Collision Avoidance System) que alerta al piloto sobre el riesgo de colisión con otra aeronave y le ofrece mecanismos para solventar el conflicto. Este sistema funciona de igual manera que el radar secundario de vigilancia comentado anteriormente, con la única salvedad de que tanto el radar como el transpondedor están a bordo de la aeronave. Aunque a priori, este sistema puede ser adecuado para mantener de manera autónoma una correcta separación entre los vehículos operando en el espacio aéreo superior, las enormes diferencias en las características de operación y prestaciones de los vehículos HAO, hacen que hoy en día estos sistemas sean incapaces de dar soporte a las operaciones HAO. Será necesario evaluar en detalle las prestaciones y la accesibilidad de los sistemas SST/SSA (*Space Surveillance and Tracking / Space Situational Awareness*) para completar el sistema de vigilancia en las operaciones HAO.

Finalmente, uno de los pilares fundamentales del desarrollo del sistema ATM altamente digitalizado y automatizado será disponer de un **sistema de información** aeronáutica preciso, íntegro y actualizado (el sistema SWIM) que ponga a disposición de los operadores toda la información que necesitan para planificar sus vuelos y operarlos en tiempo real. El sistema SWIM supone el establecimiento de la “intranet” para la aviación y el acceso a la información correcta en el momento oportuno por parte de todos los interesados en el ATM en apoyo del proceso de toma de decisiones.

5. ESTRATOPUERTOS

Los estratopuertos son las infraestructuras en tierra desde las que operan los HAPS, que se construyen preferiblemente en ubicaciones donde no haya meteorología adversa, un porcentaje del tiempo significativo, debajo de volúmenes de espacio aéreo con baja densidad de tráfico aéreo, y zonas con baja densidad de población.

Los estratopuertos HAPS cumplen cuatro funciones principales:

- Integración final y prueba de los vehículos.
- Operaciones de despegue y aterrizaje.
- Mantenimiento y reacondicionamiento.
- Desmantelamiento de HAPS al final de su vida útil.

Los dirigibles requieren grandes hangares para mantenimiento, con una longitud y altura significativas, con infraestructura para el almacenamiento y la gestión del gas de elevación. Sin embargo, los globos requieren menos infraestructura para su despliegue, mientras que un simple hangar o incluso contenedores podrían ser suficientes para su almacenamiento en tierra. Finalmente, los HAPS de ala fija pueden operar desde una pista de un aeródromo de propósito general, o desde un estratopuerto dedicado a actividades HAO que contemple también operaciones de dirigibles y/o globos.



Ilustración 25. Hangar y dirigible de la Compañía Sceye en Roswell (New Mexico) [Fuente: Sceye].

Un estratopuerto también puede incluir una instalación operativa para el mando y control del vehículo (GCS, por sus siglas en inglés) durante su tránsito, tanto en ascenso como en descenso: al inicio de la misión, despegue del HAPS y ascenso a través de la troposfera hasta el nivel operativo objetivo en la estratosfera, y al final de la misión, descenso desde la estratosfera hasta la proximidad con el suelo, y aterrizaje dentro del perímetro del estratopuerto. Los GCS tienen acceso a información meteorológica actualizada (troposférica y estratosférica), se responsabilizan de dirigir el movimiento en superficie de los HAPS en el estratopuerto, y gestionan la coordinación estratégica, pre-táctica y táctica con los proveedores de servicios de navegación aérea involucrados.

Los estratopuertos introducen varios desafíos técnicos, operativos y regulatorios, pero también ofrecen oportunidades significativas a medida que evolucionen la tecnología y el marco regulatorio. Entre los diferentes desafíos, cabe destacar los siguientes:

- **Técnicos:** desarrollo de tecnologías robustas para soportar operaciones seguras y eficientes en la estratosfera, incluyendo sistemas de lanzamiento y recuperación de aeronaves, integración de sistemas de energía sostenibles y minimización del impacto ambiental.
- **Operativos:** coordinar el tránsito aéreo de vehículos no tripulados con aeronaves tripuladas a bordo, especialmente en las fases de ascenso y descenso, requiere sistemas de gestión de tránsito aéreo avanzados y protocolos de operación que garanticen la seguridad.
- **Regulatorios:** la falta de un marco regulatorio consolidado a nivel internacional para las operaciones en la estratosfera y los estratopuertos complica la certificación de vehículos, operaciones e infraestructuras. La coordinación entre autoridades nacionales e internacionales es crucial para establecer normativas claras y coherentes.

En la Unión Europea, el Reglamento (UE) 2018/1139 regula las condiciones para la certificación y operación de los aeródromos en su ámbito de aplicación: aquellos con una pista de aterrizaje instrumental de más de 800 metros y que sirvan al transporte aéreo comercial. Para aquellas instalaciones fuera del ámbito de dicha normativa, el Estado correspondiente tendrá que desarrollar normas nacionales, a menos que se tome una decisión de ampliar el ámbito del mencionado Reglamento para incluirlos y desarrollar normas comunes para ellos.

En España, la Ley 48/1960 de 21 de julio sobre Navegación Aérea establece en su artículo 39 que “la superficie de límites definidos con inclusión, en su caso, de edificios e instalaciones, apta normalmente para la salida y llegada de aeronaves”, se considera aeródromo, pudiendo ser estos permanentes o eventuales. Por otro lado, el artículo 11 de la misma Ley de Navegación Aérea incluye como definición de aeronave, en la letra b), “cualquier máquina no tripulada que pueda sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones de la misma contra la superficie de la tierra y opere o esté diseñada para operar de forma autónoma o para ser pilotada a distancia sin un piloto a bordo”. Por tanto, los estratopuertos son considerados

en España, de acuerdo con la normativa actual, como aeródromos, en particular, como aeródromos eventuales, no sujetos a la autorización de AESA para su puesta en servicio. Si el número de operaciones pasan de las 40 anuales o de 15 al mes, pasaría a la categoría de aeródromo de uso restringido, que sí requiere autorización de establecimiento y apertura.

Por otro lado, la operación de este tipo de aeronaves puede implicar una revisión normativa. Como ejemplo, algunos vehículos utilizados para HAO emplean combustible diferente al utilizado actualmente para operaciones normales lo que puede requerir cambios en las estrategias de rescate y extinción de incendios, medios (agentes y equipos de extinción), y en general, cambios en los procedimientos operativos del aeródromo y en la capacitación del personal.

Antes de la puesta en operación hay que verificar que las condiciones físicas en el área de maniobras, la plataforma y los alrededores del aeródromo son aceptables, y que los equipos e instalaciones son adecuadas para las operaciones con HAPS. Además de las características del aeródromo, estos requisitos incluirán la demostración de competencia por parte del solicitante para garantizar que el estratopuerto y su espacio aéreo son seguros para el uso de plataformas HAPS.

A la hora de planificar la apertura y operación de un estratopuerto, se deberían valorar lo siguiente:

- **Licencia de estratopuerto:** identificar si es necesario una actualización de la certificación, en el caso de aeródromos ya existentes que quieran acoger operaciones HAO en sus instalaciones, o tramitar una certificación completa, para estratopuertos nuevos.
- **Consideraciones operacionales:** identificar el tipo de plataformas HAPS que se tiene previsto que operen en el estratopuerto, y si se va a compatibilizar con otro tipo de operaciones (aeronaves, drones).
- **Gestión de riesgos:** Desarrollar o actualizar el Sistema de Gestión de Seguridad (SMS) para mostrar las responsabilidades, los roles, la estructura de gestión, la gobernanza de la seguridad, la identificación de peligros, el análisis, la evaluación y la mitigación de los riesgos de seguridad, el programa de capacitación en seguridad y el plan de respuesta a emergencias. Desarrollar un programa de supervisión interna claro que incluya personas responsables, procedimientos, auditorías, inspecciones, incumplimiento, acciones correctivas e informes de incidentes.
- **Evaluación ambiental:** Valorar el impacto ambiental en la zona, no sólo por emisiones de ruido y gases,

o por la contaminación lumínica, sino también, en la biodiversidad o en la calidad del agua.

- **Personal:** Los estratopuertos deben contar con personal suficiente para las operaciones requeridas, incluidos, entre otros, personal de asistencia en tierra y mantenimiento y también tienen que colaborar con los operadores de HAPS y los OEM (Original Equipment Manufacturer) para desarrollar un análisis de necesidades de capacitación y capacitar al personal que trabaja con plataformas HAPS.
- **Suministros de energía:** Desarrollar un entendimiento con los fabricantes de equipos originales y los operadores de HAPS sobre los requisitos de la infraestructura de carga eléctrica. Esto incluye el acceso a la red eléctrica existente y el suministro de puntos de carga para las aeronaves. Además, se deberá disponer de capacidad de suministro y almacenamiento de gases elevadores, como el helio, o gases para alimentar motores híbridos, como el hidrógeno.
- **Cambios de espacio aéreo:** Colaborar con los proveedores ANSP para determinar si es necesario un cambio en el diseño del espacio aéreo circundante, su estructura y/o sus procedimientos.
- **Consideraciones Técnicas:** Se deben tener en cuenta las características específicas de las plataformas HAPS, no sólo de sus dimensiones, sino también de sus características técnicas y operativas.
- **Seguridad:** Consideración de las regulaciones de seguridad física y cibernética pertinentes y la orientación para operar tanto en el lado aire como en el lado tierra.
- **Instalaciones:** Las áreas de estacionamiento deben ser adecuadas para las operaciones de asistencia en tierra y tener el equipo necesario. Deben tener un tamaño adecuado para facilitar las maniobras de todas las aeronaves HAPS, incluidos los movimientos de rodaje en tierra.
- **Emergencias:** Desarrollar o actualizar un plan de respuesta a emergencias que incluya los eventos que puedan ocurrir con este nuevo tipo de aeronaves. Esto debe hacerse en conjunto con los departamentos de respuesta a emergencias, como bomberos, policía, ambulancias, etc. También debe revisarse y probarse periódicamente. Además, se deben identificar y crear acuerdos con agencias externas que respondan en caso de emergencia (p.ej.: compañías de bomberos externos, servicios de rescate, y la policía).

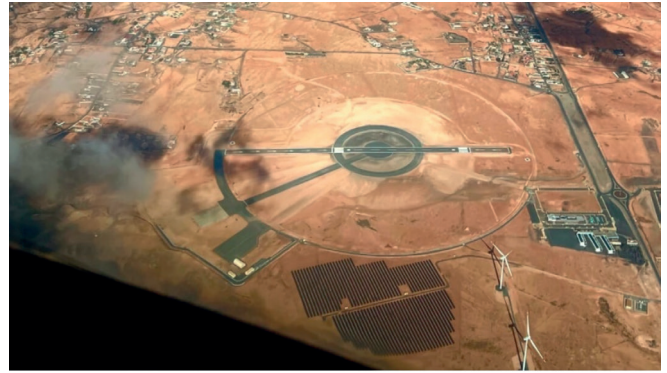


Ilustración 26. Estratopuerto de Fuerteventura.

España cuenta con el primer estratopuerto de Europa situado en el Parque Tecnológico de Fuerteventura. Este estratopuerto inauguró su pista de operaciones durante el primer semestre de 2024. Otro proyecto de estratopuerto se está desarrollando en el aeropuerto de Teruel, que dispone ya de un hangar concesionado a la empresa Elson Space España para la operación de un HAPS HTA, y además se está construyendo otro hangar de grandes dimensiones para HAPS LTA por el que la empresa Sceye ha mostrado interés en concesionar.

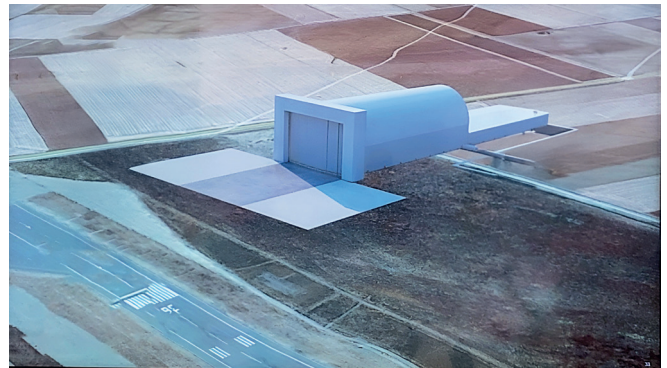


Ilustración 27. Infografía del futuro hangar para HAPS LTA en el aeropuerto de Teruel [Cortesía del Aeropuerto de Teruel].

6. MARCO LEGAL

La regulación de la operación de los HAPS se encuentra en una fase de desarrollo continuo, buscando armonizar las normas existentes de aviación civil con las necesidades específicas de las operaciones en el espacio aéreo superior. Organismos como OACI, EASA y la FAA están trabajando en la creación de marcos reguladores que aborden desde la certificación de aeronaves y estratopuertos hasta la gestión del tráfico aéreo en altitudes elevadas.

La base jurídica del derecho espacial es el Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre, mientras que la base del derecho de la aviación es la Convención de Chicago. Los Tratados de las Naciones Unidas (ONU) sobre el Espacio Ultraterrestre, así como las resoluciones de la ONU sobre el Derecho Espacial, establecen reglas y estándares internacionales para las actividades espaciales compartidas por la comunidad internacional. El principio fundamental subyacente es la libertad de acceso para la exploración y el uso en beneficio e interés de todos los países.

La principal dificultad con respecto al régimen jurídico para las operaciones HAO es la falta de consenso internacional sobre el punto de demarcación entre el espacio aéreo y el espacio ultraterrestre: el HA se encuentra encima del espacio aéreo utilizado por la aviación (dependiendo de los Estados, entre 18 km y 20 km de altura) donde prevalece el Convenio de Chicago y la soberanía de cada Estado, y está por debajo del espacio ultraterrestre donde prevalece el Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre, que establece que este último no puede ser objeto de apropiación nacional por reivindicación de soberanía de acuerdo con el mencionado Tratado.

En términos estrictamente físicos, el límite inferior del espacio ultraterrestre podría situarse en la línea Kármán, a unos 100 km de altura, donde la ausencia casi total de aire hace que para lograr sustentación aerodinámica fuera necesario alcanzar velocidades orbitales equivalentes a las de los satélites. Políticamente, el problema es más complejo: si alguna vez se definiera el límite entre el espacio aéreo y el espacio ultraterrestre marcaría el límite vertical de la soberanía de cada Estado. Mientras tanto, cada Estado puede optar por considerar que las operaciones HAO están al amparo del Derecho Aeronáutico, un Derecho Espacial nacional o un derecho híbrido combinación de ambos.

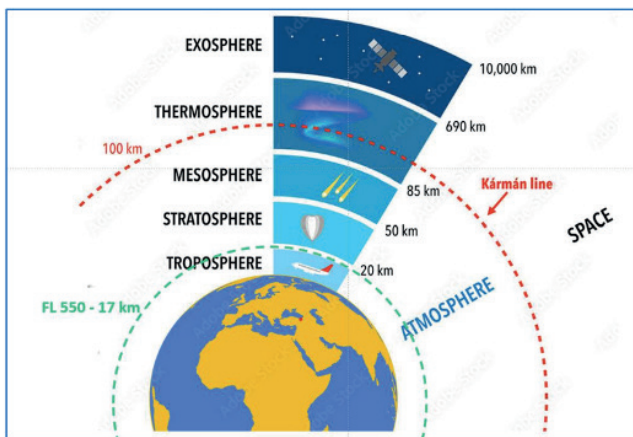


Ilustración 28. Partes de la atmósfera y frontera con el espacio exterior.

Obtener algún tipo de certificación (p.e.: Certificación de Tipo) de una Autoridad de Aviación Civil (CAA) importante es un factor clave para la operación de HAPS a gran escala por todo el mundo. Para obtener dicha certificación se debe demostrar el cumplimiento de un conjunto de requisitos definidos por la CAA. Los requisitos y guías existentes se desarrollaron para aeronaves tripuladas y, por lo tanto, a menudo conllevan ciertas suposiciones sobre las prestaciones y las misiones de las aeronaves tripuladas. Algunas de esas premisas no son válidas para los HAPS, que son diferentes de las aeronaves tripuladas en los siguientes aspectos:

1. Los HAPS no tienen tripulación, lo que significa que no hay ocupantes del vehículo aéreo en riesgo; todo el riesgo es para terceros, que puede llegar a ser escaso o inexistente según la misión y la ubicación operativa (p.e.: monitorización climática en alta mar).
2. Las misiones HAPS generalmente requieren operar durante meses, mientras que las aeronaves tripuladas realizan vuelos de horas.
3. Los HAPS operan principalmente en el entorno estratosférico y están expuestos a condiciones extremas de frío, baja densidad del aire, radiación cósmica y ultravioleta, ozono y otros factores ambientales que no suelen observarse a altitudes más bajas.
4. Se espera que los niveles de turbulencia sean bajos en la estratosfera en comparación con la atmósfera inferior donde operan las aeronaves tripuladas.
5. El tráfico aéreo es escaso en la estratosfera.
6. Los HAPS deberían operar desde aeródromos privados alejados del resto del tráfico aéreo, con secuencias de despegue y aterrizaje poco frecuentes.
7. Para minimizar el consumo de energía, las plataformas HAPS están diseñadas para ser lentas y livianas, y por lo tanto son menos maniobrables en comparación con las aeronaves tripuladas.

La ausencia de personas a bordo en los HAPS crea un paradigma de riesgo radicalmente diferente al de una aeronave tripulada: el enfoque debe dar prioridad a proteger personas en tierra y prevenir colisiones con aeronaves tripuladas, y en segunda instancia, prevenir accidentes entre UAS.

Para garantizar que la población y otras aeronaves no estén expuestas a niveles inaceptables de riesgo, un marco de certificación o aprobación debe tener en cuenta:

- La ubicación, la densidad de población y la densidad de tráfico en el espacio aéreo de la operación: operar sobre zona no habitadas y con tráfico aéreo residual crea un riesgo muy bajo.
- La cantidad (o densidad) de HAPS: el riesgo para las poblaciones en tierra y otras aeronaves depende de la cantidad de HAPS que operan en una región.
- El tiempo que se pasa sobre las poblaciones: las operaciones transitorias generalmente generan una exposición al riesgo más breve que las que lo sobrevuelan.
- Frangibilidad del sistema: los HAPS se pueden diseñar para que la plataforma sea frangible, al objeto de reducir la energía en caso de impacto (con la población en tierra u otras aeronaves).

Los objetivos de seguridad de las aeronaves tripuladas persiguen garantizar que una aeronave individual cumpla ciertos niveles de seguridad, sin tener en cuenta la cantidad de aeronaves en operación, la densidad de población, otra densidad de tráfico aéreo o la ubicación de operación. Esto hace que los objetivos de seguridad de las aeronaves tripuladas centrados en los riesgos de la propia aeronave sean demasiado conservadores para las aeronaves no tripuladas como los HAPS, lo que obligaría a sobredimensionar el diseño, penalizando las prestaciones y comprometiendo la viabilidad comercial de los HAPS.

En este sentido, hay que abordar una serie de desafíos regulatorios en el ámbito de las operaciones HAO, a saber: cómo coordinar el derecho aéreo y el derecho espacial; cómo compartir la responsabilidad entre la UE y los Estados miembros y Estados limítrofes; cómo integrar la futura reglamentación de las HAO con la reglamentación sobre drones existente y en desarrollo; cómo regular nuevos servicios en el espacio aéreo superior y hasta qué altitud; cómo establecer nuevas reglas del aire adecuadas para las prestaciones de los diferentes vehículos; cómo garantizar un acceso justo y equitativo al espacio aéreo superior; cómo establecer un nivel adecuado de seguridad para los diferentes vehículos y categorías de operaciones teniendo en cuenta el estado del arte de la tecnología; y cómo establecer interfaces y coordinación efectivas entre ATM y STM, lo cual es importante para evitar la colisión con objetos espaciales activos y desechos espaciales. También habrá que considerar cuidadosamente las cuestiones medioambientales evaluando el impacto tanto en la superficie (por ejemplo, en los lugares de despegue y aterrizaje) como en la atmósfera (troposfera, mesosfera y termosfera).

Además, también habrá que abordar la cuestión de la responsabilidad civil y los seguros, y su similitud con las operaciones espaciales. En este ámbito, será necesaria una conciliación entre el régimen de aviación, que hace responsable al operador, y el régimen espacial, que hace responsable a los Estados de lanzamiento.

De acuerdo con el Proyecto ECHO, enfoques más actuales centrados en las operaciones, basados en el riesgo y en las prestaciones podrían utilizarse como posibles alternativas a la certificación completa tradicional. Cualquiera que sea el enfoque, la regulación debe cubrir los riesgos que plantean las operaciones para terceros en tierra, en el aire, en transición hacia/desde el espacio, para las personas a bordo y las infraestructuras críticas, al tiempo que se protegen los intereses estratégicos y de la Defensa de los Estados europeos.

La reglamentación prescriptiva contiene disposiciones detalladas y objetivos de seguridad cuantitativos. Sin embargo, debido a que el sector está en su fase incipiente y hay muy pocos datos disponibles, puede que no sea fácil establecer requisitos detallados efectivos para diferentes tipos de vehículos de manera proporcionada. Alternativamente, al desarrollar requisitos basados en las prestaciones, el regulador solo establece objetivos de seguridad cualitativos que deben cumplirse mediante estándares de consenso desarrollados por la industria o los organismos de normalización y aprobados por la autoridad que pueden adaptarse mejor a arquitecturas específicas, lo que permite soluciones innovadoras.

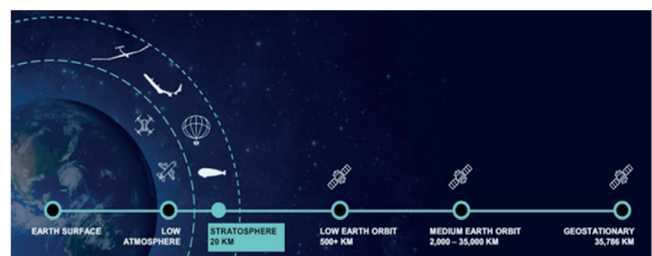


Ilustración 29. Distancia a la tierra de HAPS vs satélites [Fuente HAPS Alliance].

La capacidad de la industria de HAPS y de los reguladores para aprender e iterar es clave para el éxito de las plataformas HAPS. La HAPS Alliance propone una metodología basada en el riesgo que pudiera proporcionar un marco de aprobación gradual que permitiera que las operaciones comerciales se iniciaran en áreas de baja población y poco tráfico aéreo y se expandirán gradualmente a regiones más densas y espacios aéreos más complejos, a medida que los sistemas maduren con el tiempo. Sin embargo, es

beneficioso para los operadores de HAPS comenzar un servicio comercial limitado lo antes posible en áreas de bajo riesgo, acumular experiencia y aprender mientras generan ingresos para sostener el desarrollo. Esperar hasta que los marcos de certificación estén completamente desarrollados para comenzar las operaciones comerciales supondría un aplazamiento que penalizaría la viabilidad de los proyectos.

A raíz de un mandato de la Comisión Europea y con el apoyo de un grupo de trabajo de los Estados miembros, EASA exploró las acciones preparatorias necesarias para un futuro marco regulatorio sobre operaciones en el espacio aéreo superior (HAO), por encima del FL 550. Tras un análisis inicial del impacto de las futuras operaciones de aviación civil en el marco normativo de la UE desde una perspectiva de sistema total, se puede concluir que, si bien los Tratados de la UE permiten algunas de estas operaciones y otorgan una competencia compartida a la UE para regular algunas de ellas, en particular las que se califican como operaciones de aviación civil realizadas por aeronaves en el ámbito de aplicación de los reglamentos de la UE, la mayoría de las normas de aplicación actuales tendrían que adaptarse y/o adoptarse otras nuevas; por ejemplo, en los ámbitos de aeronavegabilidad, operaciones, ATM/ANS, medio ambiente, aeródromos, licencias de personal, etc. Dado que algunas de estas operaciones no serán tripuladas, también habrá que evaluar más a fondo las sinergias con las regulaciones sobre drones.

Debido a la incertidumbre sobre el calendario de desarrollo comercial de HAO en Europa, la hoja de ruta propone un enfoque progresivo:

- **Fase 1**, centrándose inicialmente (durante los próximos 2 a 3 años) en acciones preparatorias como estudios, pruebas y demostradores, apoyados, por ejemplo, por el concepto de entornos regulatorios (sandbox), para permitir que se realicen las primeras operaciones, mientras se aprende de ellas para diseñar de manera adecuada el futuro marco regulatorio, y dando respuesta a las necesidades del sector más inmediatas;
- **Fase 2**, consiste en implementar las acciones de la Fase 1, así como en comenzar a redactar en paralelo un marco regulatorio de la UE para permitir las HAO, para los elementos bajo la competencia de la UE/EASA. El calendario para el desarrollo de HAO comerciales en Europa (probablemente no antes de 3 años y llegando a 2030) ofrece una oportunidad única para anticipar este desarrollo. Este objetivo podría lograrse de dos maneras: modificando todos

los reglamentos existentes para garantizar que se aborde correctamente la dimensión HAO; o, mediante la preparación y adopción de un paquete normativo ad hoc y separado sobre HAO, como se hizo para los drones.

En julio de 2024, el grupo JARUS ha publicado el CS-HAPS, *Airworthiness recommendations for HAPS*, en el que se proponen requisitos de certificación para los tres tipos de aeronaves HAPS (HTA, dirigibles y globos -).

Todos estos desafíos requerirán un enfoque coordinado y colaborativo entre las instituciones aeronáuticas y espaciales, los organismos de investigación y la industria en los próximos años. La naturaleza inherentemente global de las HAO requiere cooperación internacional, en particular con la OACI, para avanzar hacia un marco internacional cada vez más consistente, capaz de soportar el grado necesario de interoperabilidad.

7. APLICACIONES

Los primeros intentos de Facebook y Google de implantar HAPS comercialmente no tuvieron éxito. Pero las inversiones recientes, las mejoras tecnológicas y el interés de las empresas de aviación tradicionales y las nuevas empresas aeroespaciales especializadas están cambiando el escenario. El objetivo es la conectividad global, una causa que llevó a que los HAPS hayan sido reconocidos como uno de los *Top 10 Emerging Technologies 2024* del Foro Económico Mundial.

En la última década, los avances tecnológicos han allanado el camino para el desarrollo e implantación de las operaciones estratosféricas: materiales más ligeros, impermeables y resistentes a las tensiones superficiales y la radiación UV, placas solares y baterías eléctricas más eficientes, miniaturización de instrumentos, desarrollo de la IA and del Machine Learning, así como avances en los modelos de predicción meteorológica. Todo ello ha reducido los costes y ha impulsado las posibilidades de diseñar vehículos HAPS que puedan operar de manera efectiva en la estratosfera durante largos periodos de tiempo.

El despliegue de HAPS es más rápido, rentable y flexible que los sistemas basados en satélites. Al mantener los equipos de comunicaciones más cerca de la Tierra que los satélites, las estaciones pueden ofrecer señales de mayor intensidad y menor latencia, lo que permitirá comunicaciones en tiempo real lo suficientemente rápidas como para comunicarse

con teléfonos inteligentes estándar, capacidades de alta resolución para funciones de captura de imágenes y una mayor sensibilidad para aplicaciones de detección.

En la siguiente tabla se recopilan las ventajas e inconvenientes de utilizar HAPS para prestar servicios de comunicaciones, navegación y observación de la tierra, frente al que se ha venido prestando desde satélites.

7.1. Observación de la Tierra

Los HAPS ofrecen un valor significativo para la observación de la Tierra en el ecosistema de seguridad europeo, ya que permiten una vigilancia continua y de alta calidad, superando a los satélites en resolución de imagen, y en resistencia a los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS).

conectividad retransmitiendo la cobertura de la red desde una puerta de enlace terrestre en funcionamiento para permitir la asistencia humanitaria con datos críticos casi en tiempo real.

Los HAPS pueden apoyar en la gestión de desastres y las iniciativas de ayuda humanitaria capturando imágenes actualizadas de alta resolución y cartografiando áreas extensas con mayor facilidad. Los HAPS pueden proporcionar conocimiento de la situación en tiempo real, recopilación de datos sobre desastres, apoyo a la toma de decisiones y respuesta efectiva en áreas donde se requieren misiones de rescate y evacuación. Los HAPS pueden también respaldar el dominio estratégico de la vigilancia marítima, proporcionando monitoreo y apoyando la seguridad en nuestras aguas.

Los HAPS pueden transportar múltiples tipos de generadores de imágenes o proporcionar servicios de telecomunicaciones y navegación junto con la observación, lo que mejora su versatilidad. El procesamiento de datos para la observación de la Tierra ya se ha desarrollado para satélites, lo que permite un análisis de datos más rápido y eficiente.

En la agricultura, las estaciones podrían utilizar tecnologías de imágenes y detección para ayudar a los agricultores a monitorizar la salud de los cultivos, las condiciones del suelo y los recursos hídricos. Su capacidad para obtener imágenes de alta resolución también podría respaldar actividades de vigilancia y seguridad, así como para la cartografía, la planificación urbana y la respuesta a desastres. Las estaciones también podrían cumplir una doble función al transportar instrumentos para el monitoreo atmosférico, estudios climáticos y detección remota de las características de la superficie de la Tierra, la vegetación y los océanos.

Las plataformas HAPS también brindan la flexibilidad de ser reprogramadas en minutos. Equipadas con cargas útiles de observación de la Tierra, las plataformas HAPS pueden brindar imágenes y videos de alta calidad las 24 horas del día, los 7 días de la semana, desde la estratosfera.

Los HAPS también pueden utilizarse para la teledetección utilizando sensores que permitan la adquisición de información clave para monitorear y proporcionar datos en tiempo real de: mapeo de recursos (carbón, petróleo, minerales, recursos hídricos), conciencia situacional de vigilancia, prevención y reducción de desastres, predicción meteorológica de alta precisión, o conservación medioambiental (lucha contra el fuego, detección de desechos, protección de bosques).

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> * Los HAPS tienen su propia fuente de energía (ya sea solar o de hidrógeno), lo que elimina la necesidad de un vehículo de lanzamiento. Esto proporciona a los HAPS la capacidad de maniobrar en la estratosfera o permanecer estacionarios en una ubicación. * La configuración de la carga útil de los HAPS son modificables ya que pueden traerse de regreso a la Tierra. Además, los HAPS también son más fáciles de actualizar, por lo que las mejoras podrían implementarse más rápidamente * Los HAPS pueden situarse en una posición fija, proporcionando una cobertura constante de un área específica. * Como los HAPS operan más cerca de la superficie de la Tierra, ofrecen menor latencia en comparación con los satélites y una mejor resolución espacial y temporal de las imágenes. * Las HAPS tienen un bajo nivel de gastos de capital (CAPEX), es decir, para lanzar una HAPS, el costo en el que incurrir las partes interesadas es menor que el de los satélites. * Los HAPS pueden complementar el ecosistema existente de infraestructura terrestre y satelital. * Los HAPS se pueden traer de regreso a la Tierra una vez que finaliza su ciclo de operación, lo que reduce la congestión dentro de la estratosfera. * Debido a su rápida implementación y menores tiempos de construcción, HAPS pueden brindar temporalmente una cobertura de red del 100 % en áreas a las que de otra manera no se podría llegar. Esto incluye cobertura durante eventos, en terrenos abruptos y durante situaciones de emergencia como calamidades naturales. * Los HAPS pueden brindar conectividad a Internet a un costo mínimo en áreas con infraestructura deficiente. * Como los HAPS tienen una altitud operativa favorable, la probabilidad de evitar obstáculos y permanecer en la línea de visión del usuario final las posiciona de manera única como una mejor solución para la propagación de radio. * Los HAPS también son potencialmente menos contaminantes que las meconstelaciones de satélites, no sólo por el combustible quemado por los cohetes durante el lanzamiento, sino también porque los satélites se queman al reingresar y pueden liberar metales nocivos a la atmósfera, mientras que los HAPS pueden funcionar con fuentes de energía limpia como la solar y el hidrógeno verde. 	<ul style="list-style-type: none"> * Aunque los HAPS están diseñados para soportar vientos intensos, las ráfagas de viento repentinas en la estratosfera (que alcanzan cerca de 220 km/h) pueden interrumpir temporalmente los servicios a bordo de los HAPS o incluso provocar la pérdida total de la comunicación. * Los HAPS tienen una resistencia limitada, incluso los HAPS de resistencia a largo plazo que pueden permanecer en el aire durante meses no alcanzan la vida útil de los satélites GEO y MEC. * Los factores externos como la alta radiación solar y las bajas temperaturas pueden provocar fallas en los componentes internos, causando tiempo de inactividad en los servicios. * La ambigüedad que prevalece en torno a la regulación de las HAPS implica tiempos de lanzamiento y costos más elevados para los operadores de HAPS, ya que deben enfrentarse a un entorno regulatorio complejo y asegurarse de que cumplen con las reglas aplicables. * En comparación con los satélites, las HAPS requieren una mayor inversión continua para gestionar y mantener una flota de aterrizaje y despegue periódicos (gastos operativos u OPEX). Las HAPS implican un alto mantenimiento en tierra y una gran huella logística, que requiere pilotos, ingenieros y canales de suministro para las operaciones terrestres. Las soluciones HAPS se pueden implementar de manera llave en mano donde pueden volverse operativas rápidamente para atender casos de uso específicos. * Dado que las HAPS se colocan más cerca de la superficie de la Tierra, su área de cobertura es menos extensa que la de los satélites. Por lo tanto, las HAPS requieren una mayor cantidad de vehículos en la estratosfera para cubrir un área similar. * Es necesario avanzar en el conocimiento de la estratosfera para definir los modelos meteorológicos que permitan la predicción y simulación de las condiciones en las que operan los HAPS. * Los principales desafíos tecnológicos de los HAPS son aumentar la cantidad de tiempo que pueden permanecer en la estratosfera, impulsar la energía ecológica a bordo y mejorar la confiabilidad, especialmente durante el despegue y aterrizaje automatizados a través de las capas turbulentas inferiores de la atmósfera. * para una cobertura global se necesitan: 3 GEO; 8/20 MEC; 40/80 LEO; y 100/150 HAPS.

Ilustración 30. Ventajas e Inconvenientes de los HAPS frente a los Satélites.

Durante 2020 hubo 416 desastres naturales en todo el mundo. Los desastres naturales tienen impactos significativos, a menudo interrumpiendo los sistemas de comunicación sobre el terreno, lo que debilita la comunicación militar y de emergencia esencial. Al estar ubicado en la estratosfera y por encima del tráfico aéreo y los fenómenos meteorológicos, los HAPS no se ven afectados por los desastres sobre el terreno, lo que permite suficiente libertad de movimiento y la capacidad de ayudar en los esfuerzos de rescate y recuperación en tiempos de desastre. Si una puerta de enlace terrestre está dañada, los HAPS pueden proporcionar

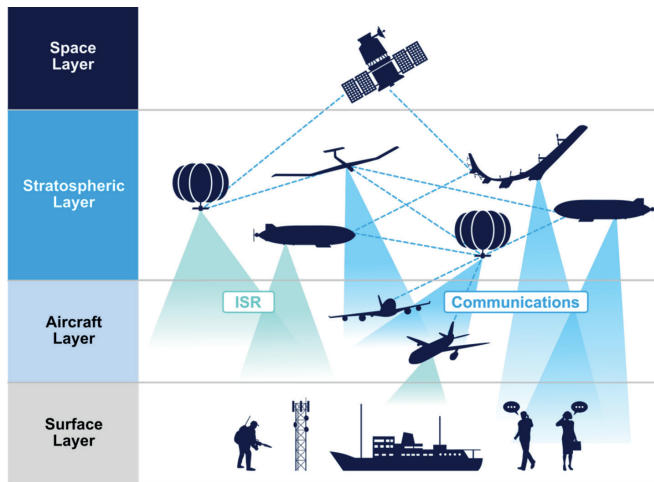


Ilustración 31. Capas de la prestación de los servicios con HAPS [Fuente HAPS Alliance].

7.2. Telecomunicaciones

Alrededor de un tercio de la población mundial, no tiene acceso a Internet o tiene conexiones deficientes debido a limitaciones de infraestructura, económicas y aislamiento geográfico. Los satélites y las redes terrestres actuales dejan brechas de comunicación en las que, debido a la geografía, instalar equipos de comunicaciones terrestres tradicionales sería demasiado costoso. Los HAPS podrían completar las brechas de cobertura de conectividad a Internet de la red terrestre y satelital.

Los HAPS están preparados para desempeñar un papel importante en las telecomunicaciones, complementando las redes terrestres y satelitales existentes, ya que pueden proporcionar conectividad de banda ancha directa al dispositivo (D2D), ofreciendo conexiones más rápidas y de menor latencia con mejor cobertura en interiores y mayor capacidad en comparación con las soluciones basadas en satélites. En este sentido, los HAPS pueden:

- admitir más usuarios por km² que los satélites y se pueden actualizar e implementar de manera flexible;
- reemplazar las redes terrestres en áreas o ubicaciones de difícil acceso con un rendimiento de red deficiente, mejorando la conectividad para aplicaciones fijas y móviles, dispositivos IoT, operaciones marítimas y UAS;
- dar conectividad de entre 50 y 100 Mbps, con un pico de 200 Mbps. Como resultado cada vez puede soportar unas 2.000 comunicaciones voz concurrentes, en un radio de 100 km.
- brindar conexiones seguras que son difíciles de interceptar o bloquear;

- desempeñar un papel fundamental en situaciones humanitarias y de emergencia, al apoyar las tareas de socorro cuando las redes terrestres están dañadas o no funcionan.

Además de los aspectos de integración operativa en materia de comunicación, especialmente los HAPS pueden permitir nuevos medios de prestación de servicios de comunicación en el espacio aéreo superior. Como complemento a los satélites y las opciones de conectividad terrestre, los HAPS podrían permitir la creación de una red “multimodal”, que actúe de manera similar a la red de radio terrestre actual y funcione como un relé. Las principales ventajas son su rentabilidad y baja latencia en comparación con los satélites. La cobertura de los HAPS podría variar desde la provisión de banda ancha fija en regiones de baja y alta densidad, la transmisión de datos de baja latencia hasta la implementación de 4G/5G. La emulación de redes celulares con HAPS abre posibles aplicaciones para escenarios de comunicación aire-tierra, aire-aire y aire-satélite. Los nodos de comunicación aerotransportados (como una forma de estaciones base LTE aerotransportadas) podrían proporcionar un radio de comunicación superior a 30 km, con transmisión omnidireccional y altas velocidades de datos a más de 1 Mbps. Estas aplicaciones podrían utilizarse potencialmente para fines ATM considerando que cuanto más denso sea el tráfico HAPS, más complejas son las trayectorias y, por lo tanto, las necesidades de separación.

Por lo tanto, los HAPS pueden actuar como infraestructura de comunicación esencial en áreas con conectividad limitada o interrumpida, por ejemplo, en regiones remotas o durante desastres naturales. Al permitir redes confiables y resistentes, pueden mejorar la comunicación (de emergencia).

Según un informe de la GSMA, “La implementación de estaciones base en áreas rurales y remotas es dos veces más costosa en términos de capital en comparación con las áreas urbanas, así como tres veces más costosa de operar para los operadores de redes móviles (MNO). La exploración de tecnologías innovadoras puede reducir el costo de implementación y operación de redes en áreas remotas”. HAPS facilitará a los MNO la entrega de conectividad a Internet a regiones sin infraestructura fija, con menores barreras de inversión de capital.

Los HAPS permiten el diseño de una amplia gama de cobertura de red, brindando conectividad no solo a dispositivos móviles sino también a dispositivos de Internet de las cosas (IoT) en estas áreas. Puede proporcionar la base para cualquier servicio de IoT, incluida la agricultura digital, la ganadería, la minería, la movilidad inteligente y la vigilancia de infraestructuras.

7.3. Navegación

Los HAPS convenientemente desplegados en soluciones puntuales o en red, pueden habilitar y mejorar la conectividad de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) en áreas remotas, como terrenos montañosos o áreas con follaje denso, lo que permite obtener información de posicionamiento, navegación y tiempo (PNT) más precisa. Adicionalmente, los HAPS:

- ofrecen ventajas para las aplicaciones de navegación debido a su proximidad a la superficie terrestre y su potencial para proporcionar señales de navegación más precisas y fiables que los satélites, especialmente en zonas con obstáculos como centros urbanos, valles montañosos y bosques;
- pueden dar apoyo a los UAS al obtener datos precisos de posición y movimiento para operaciones más allá de la línea de visión (BVLOS);
- mejoran las posibilidades de navegación y proporcionan una capa adicional de redundancia a la infraestructura de navegación existente;
- al estar mucho más cerca de la Tierra, la señal que emiten se atenúa mucho menos que la de los satélites, con lo que permite su uso en entornos urbanos con edificios altos y además se hace más difícil interferir en las señales de navegación.

Todas estas aplicaciones, y otras que se irán desarrollando en el futuro, se llevarán a cabo por los operadores de HAPS con unos altos niveles de automatización, tanto en la propia operación como en la prestación de los servicios. Además, las HAO no deberán afectar a los niveles actuales de seguridad operativa de la aviación internacional, respetando la soberanía de los países sobrevolados, en un marco que garantice la defensa y seguridad de los Estados, y prestando especial atención a la ciberseguridad de los sistemas por estar en escenarios cada vez más digitalizados.

CONCLUSIONES

Los HAPS, tanto las soluciones HTA como LTA, tienen numerosas ventajas operativas respecto a otras tecnologías satelitales o de redes terrestres de antenas para prestar servicios de comunicaciones, observación de la Tierra o navegación. Los HAPS tienen una carga útil reutilizable, latencia reducida en comunicaciones, alta resolución en vigilancia y monitorización y la posibilidad de ser operativos en áreas donde no se dispone de cobertura adecuada o por necesidades sobrevenidas en desastres o eventos multitudinarios. A todo ello, hay que añadir que presentan unos costes de financiación relativamente bajos comparados con otras soluciones de ingeniería, junto con un reducido impacto ambiental y acústico. Como tal, los HAPS ocupan un punto óptimo entre los UAS y los satélites, aprovechando la capacidad de ser operativos durante más tiempo que los primeros, y al mismo tiempo ser una solución más económica que los segundos. Sin embargo, la tecnología aún requerirá esfuerzos adicionales de innovación para su plena implantación operacional, y será necesario el desarrollo de un marco regulatorio que garantice una implementación segura y completa que dé cabida a las numerosas iniciativas de los nuevos operadores.

REFERENCES

1. Introduction to Aerospace Flight Vehicles. EMBRY-RIDDLE Aeronautical University. 2022–2024 by J. Gordon Leishman.
2. European Concept for Higher Airspace Operation. Concept of Operations V 1.0. SESAR ECHO Project. DIC 2022
3. Upper Class E Traffic Management (ETM). Concept of Operations. V1.0. FAA. May 2020.
4. Initial Feasibility Assessment of a High Altitude Long Endurance Airship. NASA. DIC 2003.
5. HAPS. Market Report. FRONTEx. MAY 2023.
6. Scientific Ballooning. N. Yajima et al. Ed. Springer. 2009
7. Airworthiness recommendations for HAPS. JARUS CS-HAPS. JUL 2024.
8. High Altitude Platform Systems. Towers in the Skies. GSMA. FEB 2022.
9. Proposal for a Roadmap on Higher Airspace Operations. EASA. MAR 2023.
10. Guidelines for Payload operations in the stratosphere. HAPS Alliance. DIC 2022.
11. Bridging the Digital Divide with Aviation in the stratosphere. HAPS Alliance. DIC 2021.
12. HAPS Certifications Path ways. HAPS Alliance. FEB 2024.
13. Acceptable Levels of Risk for HAPS. HAPS Alliance. ENE 2024.
14. HAPS Operations Using Attended Autonomous Fleet Systems. HAPS Alliance. ABR 2022.
15. HAPS Reference Architecture Series Cell Towers in the Sky. HAPS Alliance. OCT 2024.
16. Top 10 Emerging Technologies of 2024. World Economic Forum. JUN 2024.
17. An investigation of the applicability of high altitude lighter than air vehicles for the tactical communications relay problem. Andrew S. Carten Jr. NTIS. AG 1974.
18. Inertia Factors of Ellipsoids for use in airship design. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). Report No 210. 1925
19. Aerodynamics and Hovering Control of LTA Vehicles. Princeton University. W.F Putman et al. MAY 1977.
20. Commercial spacecraft: regulatory framework assessment and safety perspectives. G. Buzzo et al. ELSEVIER. 18 ABR 2024.
21. Flight Mechanical analysis of a solar-powered high-altitude platform. CEAS Aeronautical Journal (2023) 14: 201-223. Ysim J. Hasan et al. (DLR). NOV 2023.
22. Controlled-Altitude Free Ballons. AF. Spilhaus et al. College of Engineering, NY City. DIC 1947.
23. Principles for the development of a future operational concept for the higher airspace. L. Losensky & S. Kaltenhaeuser (DLR). Document ID 570432. 2022.
24. HALE Airship: Manufacture, Flight and Operation. J. Pattison. Lindstrand Technologies Ltd.
25. Driving the potential of the stratosphere. HAPS Alliance. AGO 2021.



Vista interior del Inflado del dirigible de la compañía Sceye en el hangar de Roswell (New Mexico) [Cortesía de la compañía Sceye].

AUTORES



JAIME TORRECILLA PUEBLA

Ingeniero Aeronáutico y Máster en Sistemas Aeroportuarios por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Diplomado en el Programa de Desarrollo Directivo de ESADE Business School. A lo largo de 35 años de experiencia profesional ha dado

apoyo a distintos organismos del Ministerio de Transportes: Dirección General de Aviación Civil (DGAC), Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), Aena y ENAIRE, en proyectos técnicos del ámbito de la Navegación Aérea y los Aeropuertos. Además, ha sido profesor asociado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos y del Espacio de la UPM. Actualmente, es Gerente de Transportes en Isdefe.



MARÍA ANTA GARCÍA

Máster en Ingeniería Aeronáutica por la Universidad Politécnica de Madrid. Cuenta con más de 27 años de experiencia, inicialmente en el ámbito aeroportuario y, desde hace 25 años, en colaboración con la DGAC y, tras su creación, con AESA, en la implantación de los principios de Seguridad

Operacional en la Navegación Aérea. Actualmente es Jefa del Área de Seguridad del Transporte en Isdefe, donde se desarrollan diversos proyectos en ámbitos tales como: la regulación de Navegación Aérea, la implantación del U Space y del Part IS; la evaluación de riesgos en diversos ámbitos de la aviación; la seguridad de la aviación civil (AVSEC); así como, en diversas iniciativas I+D entre las que destaca un proyecto ligado a la Movilidad Aérea Avanzada (IAM).



SUSANA DURÁN VIZUETE

Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid. Tiene 25 años de experiencia en el ámbito de la Seguridad Operacional de Navegación Aérea en Aviación Civil. Ha colaborado con la DGAC y AESA en la implantación y supervisión de los sistemas de

Seguridad Operacional de los Proveedores de Servicios de Navegación Aérea. Entre sus colaboraciones, se encuentra el apoyo al desarrollo del primer marco normativo nacional para la operación de drones. Actualmente es Jefa del Área de Supervisión del Transporte en Isdefe donde lidera proyectos estratégicos de seguridad operacional y regulación en aviación civil.



GERMÁN GONZÁLEZ ANTEQUERA

Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid y diplomado en el Programa de Desarrollo Directivo de ESADE Business School. Inició su trayectoria profesional hace más de 35 años en INISEL con el diseño de sistemas de aviónica

para el programa EUROFIGHTER. En 1991 se incorporó a Isdefe donde empezó colaborando con el Estado Mayor del Ejército del Aire y del Espacio en el desarrollo del programa SIMCA (sistema de mando y control aéreo militar). En 1996 pasó a realizar la coordinación técnica del proyecto EUROMAYA, cuyo objetivo era el despliegue de un sistema de control de tráfico aéreo en Centroamérica. Desde 1999 presta asistencia técnica al principal proveedor de servicios de Navegación Aérea en España (inicialmente a Aena y, desde su creación, a ENAIRE) en la ingeniería de sistemas aplicada a la evolución de sus sistemas para la gestión del tráfico aéreo. Actualmente es Jefe del Área de Sistemas ATM.



ESTHER NISTAL CABAÑAS

Máster en Ingeniería Aeronáutica por la Universidad Politécnica de Madrid, especialidad de Navegación Aérea, Máster en Gestión de Riesgos por la Escuela de Negocios EALDE. Cuenta con 25 años de experiencia prestando apoyo a las autoridades aeronáuticas nacionales en

cuestiones de Seguridad Operacional y Seguridad Física. Auditora AVSEC certificada por AESA desde hace 20 años. Actualmente es Coordinadora de Proyectos I+D de la Gerencia de Transporte, entre los que se encuentran proyectos financiados por la Comisión Europea en el ámbito de la Movilidad Aérea Avanzada (IAM).



JAVIER ROSANO DE LUCAS

Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid. Con casi 15 años de experiencia en Isdefe, su trayectoria profesional ha estado centrada en el ámbito del espacio aéreo y los procedimientos instrumentales de vuelo. Inició su carrera en el diseño

de procedimientos con ENAIRE como cliente. Posteriormente, y con AESA como cliente, ha trabajado en la supervisión de Proveedores de Servicios de Diseño de Procedimientos de Vuelo (FPD) certificados, en el desarrollo y seguimiento normativo en el ámbito FPD, así como en la aprobación de estructuras de espacio aéreo y procedimientos de vuelo, incluyendo la participación en la Comisión Interministerial entre Defensa y Transportes (CIDETRA).



PEDRO JOSÉ GARCÍA MORENO

Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid, especialidad de Navegación Aérea, Máster en Sistemas Aeroportuarios por la ETSIA. Acumula más de 30 años de experiencia en el mundo aeronáutico, habiendo trabajado

en el ámbito del mantenimiento aeronáutico en Ingeniería de Sistemas en Iberia y, ya perteneciendo a Isdefe, como experto en sistemas de control de tráfico aéreo durante cerca de 15 años, dando asistencia técnica a ENAIRE. Desde 2012 presta apoyo a AESA en el campo de la Seguridad de la Navegación Aérea, principalmente en normativa y regulación.



CAROLINA GOY NARANJO

Ingeniera Aeronáutica por la Universidad Politécnica de Madrid, especialidad de Navegación Aérea. Cuenta con más de 25 años de experiencia prestando apoyo a la DGAC y, posteriormente, a AESA en materia de Seguridad Operacional y Seguridad Física. Auditora AVSEC certificada por

AESA, participa en el grupo de trabajo para el seguimiento e implantación de la Hoja de Ruta para el despliegue de sistemas anti-dron en aeropuertos nacionales.



CARLOS HUGO PRIETO PEDROSA

Ingeniero Técnico Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid y Graduado en Ingeniería Aeroespacial por la Universidad de León. 25 años de experiencia ATM. Desde hace más de 20 años realiza actividades de ingeniería de sistemas como asistencia

técnica a ENAIRE para el desarrollo del Sistema Automatizado de Control de Tránsito Aéreo (SACTA) especializado en el área de vigilancia.



ENRIQUE ALFREDO CONTRERAS ALONSO

Ingeniero Técnico Aeronáutico en Aeronavegación y Graduado en Ingeniería Aeroespacial por la Universidad Politécnica de Madrid, así como Máster en Ingeniería Aeronáutica por la Universidad de León. Cuenta con más de 16 años de experiencia en el sector de la

Navegación Aérea, siempre enfocado a la gestión del espacio aéreo, pasando a colaborar con la División de Supervisión de Espacio Aéreo de AESA desde el año 2021. Dentro de esta colaboración ha ejercido como Focal Point del equipo de UAS desde su creación, contribuyendo a la implantación y seguimiento a nivel nacional de los nuevos marcos normativos europeos en materia de drones.



CÉSAR RUIZ HURTADO

Ingeniero Aeroespacial por la Universidad Politécnica de Madrid, Máster en Sistemas del Transporte Aéreo y experto en diseño de espacio aéreo y procedimientos de vuelo instrumental. Desde el inicio de su carrera profesional en Isdefe, ha colaborado con la División de

Supervisión de Espacio Aéreo de AESA, formando parte del equipo de UAS desde su creación en 2021 y contribuyendo a la implantación y seguimiento a nivel nacional de los nuevos marcos normativos europeos en materia de drones.



OLGA CLARA ARANDA GARCÍA

Máster en Ingeniería Aeronáutica y Graduado en Ingeniería Aeroespacial, especialidad de Ciencias y Tecnologías Aeroespaciales, por la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 2021 forma parte de Isdefe, habiendo trabajado en proyectos

de I+D dentro del programa europeo SESAR enfocados en el estudio de métodos de separación de UAS en espacio aéreo U-Space y en la integración de RPAS en el TMA de aeropuertos. Actualmente colabora con AESA en el ámbito de la Seguridad Operacional, con especialización en el análisis de riesgos de Navegación Aérea



RAÚL GARCÍA GONZÁLEZ

Máster en Ingeniería Aeronáutica por la Universidad Europea de Madrid y Graduado en Ingeniería Aeroespacial, especialidad de Navegación Aérea y Sistemas Aeroespaciales, por la Universidad Politécnica de Madrid. Cuenta con 6 años de experiencia profesional, habiendo trabajado 3 de ellos

como asistencia técnica en sistemas de Ala Rotatoria para el Ejército del Aire y 2 años dando apoyo en AESA en la Dirección de Navegación Aérea. Entre sus actividades se incluye la participación en el análisis normativo, procedimentación e implementación del U Space.



Mª EUGENIA PÉREZ DE MATA

Ingeniera Aeronáutica por la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 2022 forma parte de Isdefe, colaborando con AESA en el ámbito de la Seguridad Operacional. Su labor se centra en el desarrollo de metodologías de análisis de riesgos aplicadas

a operadores aéreos (CAT, COE, SPO, ATO, UAS) y organizaciones de gestión de la aeronavegabilidad (CAMO-CAO). Participa en la monitorización de la seguridad en el transporte aéreo en España y en el diseño de herramientas de gestión de datos para optimizar su análisis. Además, forma parte de un proyecto piloto para el Libro Blanco sobre la Cultura de Seguridad en Operadores Aéreos, con el objetivo de fomentar una mayor concienciación sobre la seguridad dentro del sector.



MARÍA SÁIZ CORONADO

Graduado en Ingeniería Aeroespacial y Máster Universitario en Sistemas de Transporte Aéreo por la Universidad Politécnica de Madrid. Tiene más de 4 años de experiencia en el ámbito del tráfico aéreo. Actualmente presta apoyo técnico al Área de Política de Espacio Aéreo de la

DGAC, en la gestión del espacio aéreo a nivel estratégico. Entre las actividades destacables se incluye la realización de informes sobre las actividades relacionadas con los plenos y ponencias de CIDETRA o el apoyo en los trabajos asociados al establecimiento de restricciones en el espacio aéreo por motivos medioambientales.



LAURA PARGA GATA

Graduada en Ingeniería en Sistemas Aeroespaciales por la Universitat Politècnica de Catalunya, especializada en ATM por la Universidad Politécnica de Madrid. En su paso por Isdefe ha participado en proyectos I+D europeos en el ámbito de integración de UAS y ha prestado

asistencia técnica en el Área de Política de Espacio Aéreo de la DGAC, siendo parte del nivel estratégico en la gestión del espacio aéreo. Actualmente, forma parte de Murzilli Consulting como consultora de espacio aéreo, dando apoyo a nivel internacional en el marco del ATM, tanto desde el punto de vista regulatorio como en el sentido más técnico, en trabajos relacionados con la inclusión de nuevos usuarios en el espacio aéreo.

Transporte de medicamentos con dron [Cortesia DESALT International Drones].



AGRÓNIMOS

AAM	Advanced Air Mobility	de Navegación Aérea	
ACAS	Aircraft Collision Avoidance System	EO	Electro Optics
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast	FAT	Factory Acceptance Testing
AE	Acción Emblemática	FFCCS	Fuerzas y Cuerpos de Seguridad
AENA	Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea	FMCW	Frequency-Modulated Continuous Wave
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea	ESFC	Electric Storage Fuel Cell
AHRS	Attitude and Heading Reference System	EU	European Union
AIP	Aeronautical Information Publication	EVLOS	Extended Visual Line of Sight
AFC	Alcaline Fuel Cell	eVTOL	Electric Vertical Take-Off and Landing
AFCS	Automatic Flight Control System	FAA	Federal Aviation Administration
ANS	Air Navigation Services	FATO	Final Approach and Take-Off Area
ANSP	Air Navigation Service Provider	FIR	Flight Information Region
ATC	Air Traffic Control	FIZ	Flight Information Zone
ATM	Air Traffic Management	FL	Nivel de Vuelo
ATS	Air Traffic Services	FPV	First-person view
AWY	Aerovía	FTS	Flight Termination System
BLOS	Beyond Line of Sight	GCS	Ground Control System
BRLOS	Beyond Radio Line of Sight	GEO	Geostationary Equatorial Orbit [Satellites]
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight	GIS	Geographic Information System
CAD	Computer-Aided Design	GNSS	Global Navigation Satellite System
CDM	Collaborative Decision Making	GPS	Global Positioning System
CISP	Common Information Service Provider	GSMA	Global System for Mobile Communications Assoc.
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems	HA	High Altitude
CNP	Cuerpo Nacional de Policía	HALE	High Altitude and Long Endurance
CNS	Comunicación, Navegación y Vigilancia	HAO	High Altitude Operations
ConOps	Concept of Operations	HAOSP	High Airspace Operations Service Provider
CORUS	Concept of Operations for U-Space	HAPS	High Altitude Platform System/Station
COVID	Coronavirus Disease	HEMS	Helicopter Emergency Medical Service
CSFL	Continued Safe Flight and Landing	HF	High Frequency
CTA	Área de Control.	HTA	Heavier than air
CTR	Zona de Control	HTFC	High temperature fuel cell
C-UAS	Contra-UAS	HTOL	Horizontal Take-Off and Landing
D2D	Conectividad Directa al Dispositivo	IA	Inteligencia Artificial
DAA	Detect and Avoid	IAM	Innovative Air Mobility
DAR	Dynamic Airspace Reconfiguration	IAS	Innovative Aerial Services
DFR	Digital Flight Rules	IFR	Instrument Flight Rules
DGAC	Dirección General de Aviación Civil	ILS	Instrument Landing System
DGT	Dirección General de Tráfico	IMU	Inertial Measuring Unit
DMA	Dynamic Mobile Area	INS	Inertial Navigation System
DME	Distance Measurement Equipment	IoT	Internet of Things
DRI	Direct Remote Identification	IR	Rayos Infrarrojos
EASA	European Union Aviation Safety Agency	JEY-CUAS	Joint European Counter Unmanned Aerial Systems Countermeasures System
EDM	Electronic Distance Measurement		
ENAIRES	Entidad Pública Empresarial		

LEO	Low Earth Orbit [Satellites]	SAR	Search and Rescue
LIDAR	Light Detection And Ranging	SAT	Site Acceptance Test
LSS	Low, Slow, Small	SATCOM	Satellite Communications
LTA	Lighter than air	SESAR	Single European Sky ATM Research
LUC	Light UAS Operator Certificate	SESAR JU	SESAR Joint Undertaking
NFL	National Football League	SIGLO-CD	Sistema Global Contra Drones
MALE	Middle Altitude and Long Endurance	SLAM	Simultaneous Location and Mapping
MEMS	Micro Electro-Mechanical System	SMI	Sustainable Mobility Indicators
MEO	Medium Earth Orbit [Satellites]	SMR	Surface Movement Radar
ML	Machine Learning	SMS	Sistema de Gestión de Seguridad
MLAT	Multilateration	SNS	Sistema de Notificación de Sucesos
MNO	Operadores de redes móviles	SORA	Specific Operations Risk Assessment
MSL	Mean Sea Level	SSA	Space Situational Awareness
MSSR	Monopulse Secondary Surveillance Radar	SSR	Radar de vigilancia secundaria
MSSR-S	MSSR Mode S	SST	Space Surveillance and Tracking
MTOM	Maximum Take-Off Mass	STM	Space Traffic Management
MTOW	Maximum Take-Off Weight	SWIM	System Wide Information Management
NASA	National Aeronautics and Space Administration	TBO	Trajectory Based Operations
NPA	Notices of Proposed Amendment	TCAS	Traffic Collision Avoidance System
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional	TMA	Terminal Maneuvering Area
OBU	On Board Unit	TRL	Technology Readiness Level
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible	UAM	Urban Air Mobility
OEM	Original Equipment Manufacturer	UAS	Unmanned Aerial Systems
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	UAV	Unmanned Aerial Vehicles
PANDU	Plan de Acción Nacional de Despliegue de U-Space	UHF	Ultra High Frequency
PEMFC	Proton-exchange membrane Fuel Cells	UIR	Upper Information Region
PLD	Carga de Pago	UME	Unidad Militar de Emergencias
PNT	Posicionamiento, Navegación y Tiempo	USSP	U-Space Service Provider
PSR	Radar de vigilancia primaria	UTM	UAS Traffic Management
PTZ	Pan-Tilt-Zoom	V2I	Vehicle-to-Infrastructure
RADAR	Radio Detection and Ranging	V2V	Vehicle-to-Vehicle
RAM	Regional Air Mobility	VCA	VTOL Capable Aircraft
RCS	Radar Cross-Section	VFR	Visual Flight Rules
RF	Radiofrecuencia	VHF	Very High Frequency
RGB	Red, Green, Blue	VLL	Very Low Level
RLOS	Radio Line of Sight	VLOS	Visual Line of Sight
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System		
RSU	Road Side Unit		
RTH	Return-To-Home		
RTK	Real Time Kinematic		
RTT	Round Trip Time		
RVSM	Reduced Vertical Separation Minima		
SAFC	Solid acid fuel cell		

Serie Cuadernos Tecnológicos

Cuadernos de Isdefe



TÍTULOS PUBLICADOS

- 1. CAPACIDADES MILITARES EN EL ÁMBITO EUROPEO DE LA DEFENSA.**
- 2. SISTEMAS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAS) MILITARES.**
- 3. SISTEMAS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAS) CIVILES.**



Isdefe



Isdefe

C/ Beatriz de Bobadilla, 3
28040 Madrid
Tel.: +34 91 411 50 11
Email: general@isdefe.es
www.isdefe.es

