



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Análisis e implicaciones técnicas del empleo de sistemas
de aeronaves no tripuladas

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Fernández Chinchón, Jorge

Tutor/a: Ramón Fernández, Francisca

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



MÁSTER EN INGENIERÍA AERONÁUTICA

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**ANÁLISIS E IMPLICACIONES TÉCNICAS DEL
EMPLEO DE SISTEMAS DE AERONAVES NO
TRIPULADAS**

Alumno:

Fernández Chinchón, Jorge (jorferch@etsid.upv.es)

Profesora:

Dra. Francisca Ramón Fernández

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

15 de marzo de 2024

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar las implicaciones técnicas y jurídicas que pueden derivar del uso de aeronaves no tripuladas. Son objeto de estudio la repercusión que de su utilización pueda derivarse para la seguridad aérea, zonas medioambientales de especial protección, defensa del espacio aéreo nacional, Derechos Fundamentales de los ciudadanos como la intimidad, responsabilidad civil y problemática de la diversificación hacia nuevos usos como el recreativo, de transporte, el armamentístico o el espionaje entre países.

Por otro lado, se atiende especialmente al impacto en el campo de la ingeniería que el marco normativo tiene sobre estos sistemas, examinando posibilidades de optimizar sus funcionalidades para limitar y adaptar las condiciones de vuelo al espacio geográfico (zonas del espacio aéreo no autorizadas) y a las más modernas necesidades de uso (fotometría, medición de superficies, caracterización del terreno).

Se pretende que la utilización cada vez más generalizada de este tipo de aeronaves pueda conjugarse con una regulación actualizada a los rápidos cambios que se producen en la industria y atendiendo de manera eficaz a las posibles lagunas legales que vayan surgiendo en su desarrollo, poniendo de relieve las necesidades de una armonización legislativa en la comunidad internacional, en un nivel similar al de la aviación comercial.

PALABRAS CLAVE: *Vehículo aéreo no tripulado (UAV), Seguridad aérea, Espacio aéreo, Marco normativo, Regulación*

Abstract

The objective of this work is to analyze the technical and legal implications that may arise from the use of unmanned aerial vehicles (UAVs). The study focuses on the impact that their use may involve on aviation safety, environmentally protected areas, defense of national airspace, citizens' fundamental rights such as privacy, civil liability, and the challenges of diversification towards new uses such as recreational, transportation, military, or espionage purposes among countries.

On the other hand, special attention is paid to the impact on the engineering field that the regulatory framework has on these systems, examining possibilities for optimizing their functionalities to limit and adapt flight conditions to the geographic space (unauthorized airspace zones) and the latest usage needs (photometry, surface measurement, terrain characterization).

It is intended that the increasingly widespread use of this type of aircraft can be combined with updated regulation that responds effectively to the rapid changes occurring in the industry and addresses the possible legal gaps that may arise during its development, highlighting the need for harmonization of legislation at the international community level, in a similar manner to that of commercial aviation.

KEY WORDS: *Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Aviation safety, Air space, Regulatory framework, Legislation*

Resum

L'objectiu d'aquest treball és analitzar les implicacions tècniques i jurídiques que poden derivar de l'ús d'aeronaus no tripulades. Són objecte d'estudi la repercussió que de la seua utilització puga derivar-se per a la seguretat aèria, zones mediambientals d'especial protecció, defensa de l'espai aeri nacional, Drets Fonamentals dels ciutadans com la intimitat, responsabilitat civil i problemàtica de la diversificació cap a nous usos com el recreatiu, de transport, l'armamentístic o l'espionatge entre països.

D'altra banda, s'atén especialment l'impacte en el camp de l'enginyeria que el marc normatiu té sobre aquests sistemes, examinant possibilitats d'optimitzar les seues funcionalitats per a limitar i adaptar les condicions de vol a l'espai geogràfic (zones de l'espai aeri no autoritzades) i a les més modernes necessitats d'ús (fotometria, mesurament de superfícies, caracterització del terreny).

Es pretén que la utilització cada vegada més generalitzada d'aquesta mena d'aeronaus puga conjugar-se amb una regulació actualitzada als ràpids canvis que es produeixen en la indústria i atenent de manera eficaç a les possibles llacunes legals que vagen sorgint en el seu desenvolupament, posant en relleu les necessitats d'una harmonització legislativa en la comunitat internacional, en un nivell similar al de l'aviació comercial.

PARAULES CLAU: *Vehicle aeri no tripulat, Seguretat aèria, Espai aeri, Marc normatiu, Regulació*

Índice

Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
2. Metodología	2
3. Objetivos	3
4. Espacio aéreo	4
4.1. Distribución del Espacio Aéreo en nuestro país	4
4.2. Zonas Obligatorias de Radio (RMZ), Transpondedor (tmz) y Plan de vuelo (FPMZ)	8
4.3. Zonas no permitidas	9
5. Aspectos Regulatorios y Técnicos	13
5.1. Marco legislativo	13
5.1.1. Marco internacional	13
5.1.2. Marco regulatorio europeo	15
5.1.3. Marco regulatorio español	34
5.2. Geoconsciencia	45
5.2.1. Capacidad de detección de obstáculos	45
5.2.2. Posicionamiento	46
5.2.3. Navegación	49
5.2.4. Conocimiento del espacio aéreo	51
5.2.5. Comunicación	60
5.3. Análisis de mitigación de riesgos	62
5.3.1. Mitigación de riesgos en el espacio aéreo controlado	62
5.3.2. Metodología SORA	64
5.4. Sensorización	73
5.4.1. Principales sensores	73
5.4.2. Sistemas de detección de UAS en zonas restringidas del espacio aéreo	94
5.4.3. Implicaciones de la toma de datos sin consentimiento y derecho a la intimidad	102
6. Desarrollo tecnológico	111
6.1. Futuras aplicaciones en UAS	111
6.2. IA y evoluciones legislativas	119

7. Conclusiones	123
8. Presupuesto	125
9. Referencias	127

Índice de figuras

4.1. Representación de los FIR de España separados por los ARN EUR y AFI .	5
4.2. Representación gráfica del FIR de Barcelona y del FIR de Madrid, incluyendo las zonas que definen el espacio aéreo controlado (TMA, CTR, ATZ, ...). Aplicación Insignia de Enaire	6
4.3. Representación de RMZ, TMZ y FPMZ dentro de los FIR de Madrid y Barcelona. Aplicación de Enaire Insignia.	9
4.4. Ejemplo de zonas protegidas y prohibidas en el FIR de Canarias. Aplicación de ENAIRE Insignia.	10
4.5. Representación de las Zonas DPR en los FIR de Madrid y Barcelona obtenidos a través de la aplicación Insignia de ENAIRE.	11
4.6. Ilustración de una zona restringida del espacio aéreo durante un periodo de tiempo determinado. En este caso, desde las 6 horas del día 13/11/2023 hasta las 18 horas del día 31/12/2023.	12
5.1. Requisitos para el marcado de clase 0.	16
5.2. Requisitos para el marcado de clase 1.	17
5.3. Requisitos para el marcado de clase 2.	18
5.4. Requisitos para el marcado de clase 3.	19
5.5. Requisitos para el marcado de clase 4.	19
5.6. Requisitos para el marcado de clase 5.	20
5.7. Requisitos para el marcado de clase 6.	20
5.8. Ejemplo de dron con marcado de clase 0.	21
5.9. Ejemplo de dron con marcado de clase 1.	21
5.10. Ejemplo de dron con marcado de clase 2.	21
5.11. Ejemplo de dron con marcado de clase 3.	22
5.12. Ejemplo de dron con marcado de clase 4.	22
5.13. Comparativa de precios por dron.	23
5.14. Comparativa MTOM por dron.	23
5.15. Comparativa de velocidades por dron.	24
5.16. Comparativa de autonomía por dron.	24
5.17. Dron DJI Mini 3.	32
5.18. Especificaciones técnicas dron juguete Syma X5.	33
5.19. Ilustración 5Organigrama reducido del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.	40
5.20. ENAIRE Drones.	44
5.21. Triangulación de un punto mediante el método de la trilateración.	48
5.22. Diferencias entre radar primario y radar secundario (SSR).	52
5.23. Esquema de funcionamiento ADS-B.	53

5.24. Representación de la incorporación de un transpondedor “ping200” de uAvionics en un UAV.	57
5.25. Ejemplo de un diagrama de control UAS para generar trayectorias alternativas tras detección de obstáculos.	58
5.26. Ejemplo de trayectoria alternativa calculada por el controlador del UAS tras haberse detectado un obstáculo que constituye una fuente no cooperativa.	60
5.27. Representación de puntos y áreas NOTAM en la aplicación Enaire Insignia.	63
5.28. Aplicación ENAIRE drones. La aplicación muestra el CTR de Valencia como zona perteneciente al espacio aéreo controlado, indicando que los RPAS no pueden por lo general operar en esta zona.	64
5.29. Esquema de la metodología SORA.	65
5.30. Esquema de los volúmenes alrededor del dron según la metodología SORA	67
5.31. Determinación del ARC.	69
5.32. Reducción del ARC hasta niveles menores mediante la implementación de mitigaciones estratégicas.	70
5.33. Ejemplo de sensor magnetómetro de tipo fluxgate en un dron para sondeo geofísico.	73
5.34. Ejemplo de acelerómetro capacitivo MENS Digital.	74
5.35. Representación de un giroscopio de una aeronave.	76
5.36. Funcionamiento de los Sistemas de Navegación Inerciales (INS). Esquema del flujo de datos procedente de la IMU y de otros sensores para estimar posiciones, velocidades, actitudes y otros parámetros relativos a la navegación de los UAS mediante el filtrado de Kalman.	78
5.37. Ejemplo de funcionamiento de un Sistema de Navegación Inercial (INS) de la compañía SGBsystems.	78
5.38. Dron en vuelo con sistema LIDAR incorporado.	79
5.39. Ejemplo de captación de datos mediante LIDAR.	80
5.40. Proceso para generar un modelo digital del terreno o modelo digital de elevaciones (DEM).	81
5.41. Esquema del proceso de un levantamiento LIDAR mediante una aeronave.	81
5.42. Sensor Velodyne’s Puck LIDAR.	82
5.43. Sensor de ultrasonidos SKU HCSR04 con placa Arduino.	84
5.44. Esquema de conexiones entre cuatro sensores ultrasónicos SKU HCSR04 con la placa Arduino de evasión de obstáculos.	85
5.45. Módulo infrarrojo para detección de obstáculos DJI FPV.	87
5.46. Variación de la densidad y la presión atmosférica con la altitud.	88
5.47. Módulo de placa del Sensor de presión barométrica Digital BMP180.	89

5.48. Imágenes captadas con cada una de las cámaras del DJI Mavic 3 Pro. De izquierda a derecha: 1. Cámara Hasselblad (con buena calidad y ciencia del color). 2. Telecámara 166 mm (de mayor resolución, permite hasta 7 aumentos). 3. Telecamara intermedia 70 mm (con zoom óptico de 3 aumentos).	92
5.49. MSistema de detección de drones por radiofrecuencia.	97
5.50. Posible situación en la que se emplea un sistema antidron tipo pistola para inhibir las señales que recibe el dron.	97
5.51. Sistema radar para la detección de drones.	98
5.52. Sistema de Detección de vehículos aéreos no tripulados AUDS (Detect Track Identifier Counter Drone) utilizado por el Ministerio de Defensa, combinando varias técnicas de detección.	102
5.53. Esquema Tratamiento de datos en función de las operaciones a realizar con drones.	108
6.1. Dos ejemplos de drones para el transporte de mercancías. “Cargo Robot” de ICO Drones y el Dron industrial de “Daganfly Drones”.	113
6.2. Primer vuelo del proyecto Ale-Hop, enfocado en el transporte de medicamentos entre Hospitales de la Comunidad de Madrid. Verano de 2023. . . .	114
6.3. Aeronave Volocopter, con 18 rotores, creada por la startup Volocopter con sede en Alemania.	115
6.4. Caracterización del terreno en levantamientos topográficos mediante drones.	116
6.5. Dron militar Predator B.	118
6.6. Dron militar CH-4.	118
6.7. Dron militar Hermes 900.	119
6.8. Dron miliar Shahed 136.	119
6.9. Enfoque del riesgo IA.	121

Índice de tablas

1.	Requerimientos de comunicación con Control de tráfico aéreo (ATC) o los servicios de información de vuelo (FIS) según el tipo de vuelo y de espacio aéreo en el que se realice.	8
2.	Requisitos por categorías de SANT	29
3.	Diferencias entre la obligación/no obligación de registro.	33
4.	Tipos de operaciones VLL (Very Low Level).	46
5.	Mitigaciones tácticas complementarias a VLOS/BVLOS.	56
6.	Ejemplos de transpondedores actuales incorporados en FPAS.	57
7.	Ejemplo de algunas medidas de atenuación estratégicas propuestas por la AESA en según la categoría operacional del RPAS, así como de las condiciones de operación.	63
8.	Tipos de procedimientos que pueden realizarse en vuelo dependiendo del tipo de volumen definido por SORA.	66
9.	Nivel de robustez de los sistemas del RPAS según el nivel de riesgo residual de colisión en el aire.	70
10.	Primeros objetivos de operación (OSO) con su nivel de robustez requerido según el valor del SAIL.	71
11.	Principales características de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C0, C1 y C2.	91
12.	Principales características de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C3 y C4.	91
13.	Principales especificaciones sobre la resolución de video de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C0 y C1.	93
14.	Principales características de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C3 y C4.	94
15.	Ventajas e inconvenientes del uso de radiofrecuencia en sistemas de detección de drones.	96
16.	Ventajas e inconvenientes del uso radares como sistemas de detección de drones, como el radar Doppler pulsante.	98
17.	Ventajas e inconvenientes del uso de sistemas de detección visual o térmica.	99
18.	Ventajas e inconvenientes del uso de sistemas de detección de drones basados en redes Wifi y/o Bluetooth.	100
19.	Ventajas e inconvenientes del uso de sistemas acústicos en detección de drones.	101
20.	Principales especificaciones de dos ejemplos de drones para el transporte de mercancías. “Cargo Robot” de ICO Drones y el Dron industrial de “Daganfly Drones”.	112

21. Cómputo de horas dedicadas al proyecto y estimación de la remuneración correspondiente.	125
22. Estimación del coste derivado del gasto eléctrico durante el proyecto. . . .	126

1. Introducción

A lo largo de los últimos años, se está experimentando un incremento significativo del empleo de aeronaves no tripuladas que se encuentran en el mercado a disposición de un número creciente de usuarios. En paralelo, el desarrollo tecnológico impulsado por esta creciente demanda ha favorecido la aparición de nuevas aplicaciones que han multiplicado sus posibilidades de uso.

El propósito del presente trabajo consiste en la realización de un análisis exhaustivo de los Sistemas de Aeronaves no tripuladas. Para ello, es imprescindible analizar, en primer lugar, el área de operaciones, que viene dado por el espacio aéreo. Una vez enmarcado el entorno, deberá atenderse al marco normativo que condiciona la operatividad de estos sistemas, sin olvidar que la regulación trasciende las fronteras estatales y resulta natural que, por parte de organizaciones internacionales y supranacionales, se haya tratado de armonizar una legislación, en ocasiones compleja y en continua revisión.

El estado del arte es objeto igualmente de estudio, en aspectos tan importantes como la geoconsciencia de que se está dotando a esta clase de aeronaves; la protección de los usuarios y de terceros de los riesgos que se derivan de la realización y diseño de operaciones y el empleo de sistemas de mitigación de los anteriores mediante la implementación de metodologías estandarizadas.

No cabe tampoco desatender las implicaciones de la utilización de sensores de diversa tipología y precisión en la captación de información y datos del entorno y la conjugación de la generalización de su uso con problemáticas como la seguridad nacional o la protección de derechos individuales, que se intentan atenuar a través del desarrollo tecnológico de sistemas de detección de drones.

Finalmente, se esbozarán posibles escenarios futuros para tratar de predecir la evolución tanto técnica como legislativa, valorando si la respuesta regulatoria obedece a las aplicaciones actualmente existentes o si, por el contrario, responde al temor a lo que la técnica sea capaz de desarrollar en las próximas décadas por la aparición de novedosas y desconocidas herramientas como la inteligencia artificial.

2. Metodología

El enfoque del presente Trabajo de Fin de Máster consistirá en una revisión de las fuentes normativas que afectan a los sistemas de aeronaves no tripulados, con especial atención a los aspectos técnicos y a los requerimientos en función del tipo de UAS y de la operación a realizar, así como a su impacto en los componentes y estructura del mismo.

Para ello se realizará una revisión de la legislación partiendo de la más general, la internacional, a la más particular, la regulación española, atendiendo a las normas o directrices aprobadas o proporcionadas por las distintas organizaciones internacionales, europeas y nacionales en la materia. Será de especial utilidad la consulta del Boletín Oficial del Estado tanto para el estudio de la normativa española como internacional o europea, publicada en él, así como del Diario Oficial de la Unión Europea EUR-Lex. Asimismo, la aplicación CENDOJ permitirá un análisis y búsqueda exhaustivos de la jurisprudencia en lo relativo a los drones. También se recurrirá a la información publicada por la Agencia Estatal de Protección de Datos a través de su página web.

Desde el punto de vista técnico, se emplearán las aplicaciones de ENAIRE drones e Insignia para tomar ejemplos de cómo la abundante legislación existente se plasma en la práctica y cómo permite informar a los usuarios de UAS a tiempo real de cualquier cambio que pudiera afectar a sus operaciones con el fin de garantizar la seguridad del tráfico aéreo.

Se buscará información en internet, noticias en periódicos digitales, así como en la bibliografía relacionada al final del presente trabajo y en otras investigaciones realizadas por alumnos de otras universidades, tanto en trabajos de final de grado o máster o tesis. El proceso de búsqueda de información se ha centrado principalmente en el campo de la navegación aérea y del desarrollo tecnológico y aplicaciones que han ido incorporándose a los UAS en los últimos años.

Las principales limitaciones al estudio se encuentran en la abundante, técnica y compleja legislación existente y en los cambios que sufre por la rapidez con que surgen las innovaciones en este campo. Por otro lado, la aparición de la inteligencia artificial puede acarrear un cambio significativo en el desarrollo legislativo en el corto-medio plazo, por la revolución tecnológica que se prevé que se produzca en el sector.

El plan de trabajo consistirá en un estudio paralelo basado en dos ejes: por un lado, el estado del arte de la tecnología que incorporan los UAS y sus posibilidades de desarrollo y mejora y, por otro, el marco legislativo vigente a todos los niveles.

3. Objetivos

A continuación se exponen los principales objetivos de este proyecto:

OBJETIVO PRIMARIO

El conocimiento exhaustivo de los sistemas de aeronaves no tripuladas, tanto en su ámbito tecnológico interno como del campo normativo en que operan, tratando de vaticinar la evolución del sector, sus amenazas y sus previsiones de crecimiento y explotación.

OBJETIVO SECUNDARIO

Entender aspectos accesorios de las operaciones con UAS e intentar responder a los interrogantes que un usuario de drones se puede plantear para la realización de las operaciones, sirviendo de guía práctica o compendio de normativa que puede afectar a su desarrollo.

4. Espacio aéreo

4.1. Distribución del Espacio Aéreo en nuestro país

Teniendo presente que se debe garantizar la seguridad de las operaciones que empleen aeronaves no tripuladas, el piloto debe ser consciente del espacio aéreo en el que el vuelo se va a desarrollar, además de las particularidades a las que puede estar sometido dicho espacio en el momento de la operación.

Así pues, el espacio aéreo se encuentra dividido, en primera instancia, en regiones de navegación aérea (ARN, “*Navigation Regions*”). Estas ARN han sido definidas por la OACI como zonas de gran extensión que abarcan espacios que comparten circunstancias y particularidades específicas de navegación aérea que aconsejan su agrupación en regiones a efectos de delimitación del espacio aéreo (a saber: Región África-Océano Índico (AFI); Región de Asia (ASIA); Región Caribe (RCA); Región Europea (EUR); Región de Medio Oriente (MID); Región de América del Norte (NOAL); Región del Atlántico Norte (NAT); Región del Pacífico (PAC) y Región Sudamericana (SAM)) [1]. El espacio aéreo de la Península pertenece a la Región Europea (EUR).

Delimitado el ARN de nuestro país, si se atiende a razones relacionadas con la responsabilidad y la información durante el vuelo, se puede realizar la siguiente clasificación [2]:

- **Espacio aéreo superior/inferior.** Esta distinción se basa en la altitud de vuelo, dedicándose las regiones del espacio aéreo superior a las superiores a FL245 y el espacio aéreo inferior a las que se encuentran por debajo de ese valor. Aunque este límite puede variar en función del país y su regulación, en España queda estipulado en los 7300 m.
 - El espacio aéreo inferior suele incluir tanto las áreas cercanas a los aeropuertos como las aerovías que vuelan a menores altitudes. En estas regiones se encuentran generalmente las regiones de información de vuelo (“*Flight Information Regions*”, FIR), que están provistas de servicios de información y de alerta durante el vuelo. España consta de tres regiones de este tipo: FIR de Madrid, de Barcelona y de Gran Canaria.
 - Por su parte, en el espacio aéreo superior se encuentran las aerovías por las que las aeronaves circulan a mayores altitudes. Dentro del espacio aéreo superior se encuentran las regiones de información correspondientes a este tipo de espacio aéreo (“*Upper Information Regions*”). Éstas están provistas únicamente de servicios de información de vuelo. [3]

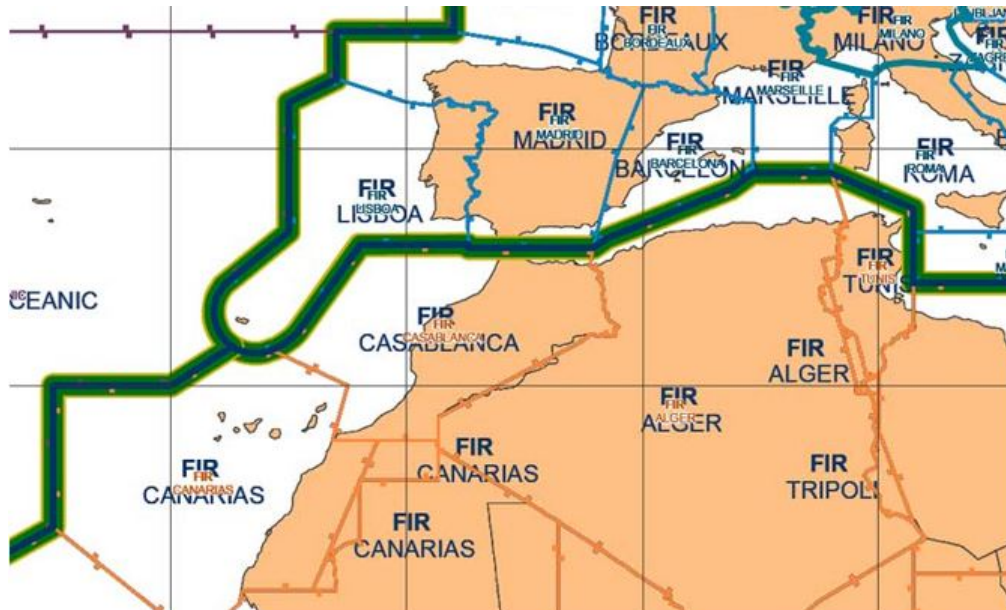


Figura 4.1: Representación de los FIR de España separados por los ARN EUR y AFI. [4]

- **Espacio aéreo controlado/ no controlado.** Esta distinción en las regiones del espacio aéreo se basa en la existencia o no de los servicios de control de tráfico aéreo.
 - **Espacio aéreo controlado.** Se caracteriza no únicamente por la existencia de servicios de alerta e información para las aeronaves que entran en este espacio aéreo, sino también por la presencia de servicios de control de tráfico aéreo (ATC), que ejercen un control sobre las aeronaves de carácter preceptivo, por lo que el piloto, sea in situ o a distancia, deberá obedecer las directrices que le sean impuestas.

Además, el piloto está obligado a reportar la posición de la aeronave y de mantener los límites de separación con otras aeronaves correspondientes a ese espacio aéreo o las que vengan asignadas por ATC.

Según se dispone en el Reglamento (UE) 923/2012[5] y también según se recoge en el AIP de España[6] el espacio aéreo controlado está constituido por:

- Las tres regiones FIR/UIR de las que consta España entre FL150 y FL460, exceptuando ciertas zonas restringidas de manera permanente o temporal.
- Las aerovías, tanto si están en el espacio aéreo superior como en el inferior.
- Ciertas zonas de control próximas a los principales aeropuertos, incluyendo las Áreas de control (CTA), las zonas de control terminal (TMA) y las zonas de control (CTR).

- o Zonas del espacio aéreo tales como las de coordinación reducida (RCA), coordinación previa (PCA) espacio aéreo temporalmente segregado o reservado (TSA o TRA).

Los servicios ATC se aplican tanto a vuelos en visual (VFR) como en instrumental (IFR).

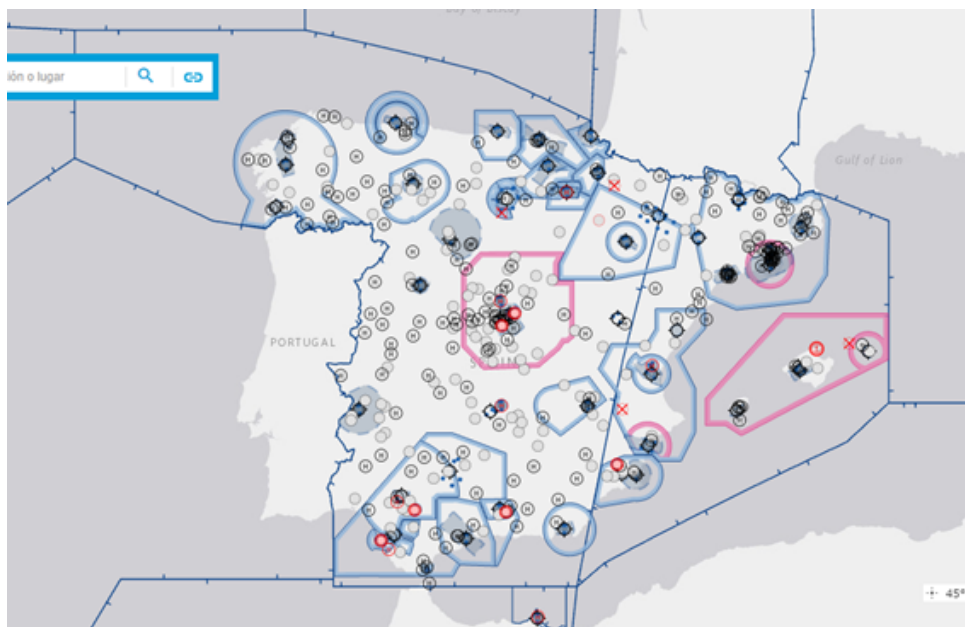


Figura 4.2: Representación gráfica del FIR de Barcelona y del FIR de Madrid, incluyendo las zonas que definen el espacio aéreo controlado (TMA, CTR, ATZ, ...). Aplicación Insignia de Enaire. [7]

- **Espacio aéreo no controlado.** Por su parte, este tipo de espacio aéreo se compone de las zonas que no se incluyen en el espacio aéreo controlado. Las operaciones que en él se realicen están provistas de servicios de información y alerta (FIS), pero no de servicios de control de tráfico aéreo (ATC). Por tanto, es responsabilidad del piloto mantener las separaciones correspondientes con las demás aeronaves, no teniendo la obligación de informar de su posición a estos servicios.

A efectos prácticos, el espacio aéreo no controlado se compone de zonas lejanas de los aeropuertos más concurridos, además de zonas de bajo tránsito aéreo.

Por lo que se refiere a los vuelos en el espacio aéreo no controlado (clases F y G) en instrumental (IFR), se recoge en el propio Reglamento de la Unión Europea (UE) 923/2012 [8] la necesidad de establecer comunicación en ambos sentidos con la dependencia de los servicios de tránsito aéreo, pues, en este tipo de vuelos, la autoridad competente podría exigir que la aeronave se mantenga

a la escucha y mantenga comunicación en ambos sentidos, así como requerir por la dependencia de servicios de tránsito aéreo que el piloto informe sobre la posición de la aeronave.

Según se dispone en la Circular OACI 328-AN/190 [9] en su apartado referente a las radioayudas para la navegación y equipos de navegación a bordo, las RPAS deben contar con los requisitos de comunicaciones (además de los respectivos a la navegación y vigilancia) correspondientes al espacio aéreo en el que se está realizando la operación. Por tanto, dado que puede resultar exigible la comunicación con los servicios de tránsito aéreo, en los supuestos de vuelos de RPAS que operen en espacio aéreo no controlado en instrumental, principalmente vuelos B-VLOS, la autoridad competente podría demandar equipamiento a bordo para comunicaciones por radio pese a encontrarse en zonas del espacio aéreo no controlado. No obstante, tales comunicaciones se realizarían en todo caso con los servicios de información de vuelo (“Flight Information Service”, FIS), no con los servicios de control de tráfico aéreo (ATC) propios del espacio aéreo controlado. Los primeros resultan de gran utilidad en las operaciones de vuelo, pues ofrecen información al piloto de la aeronave relativa a aspectos tales como las condiciones del clima durante la operación, cambios relevantes en relación con la disponibilidad de servicios de ayuda en la navegación, condiciones atmosféricas inusuales y otro tipo de circunstancias que puedan poner en peligro la seguridad aérea. [10]

A modo de resumen, se presenta en la Tabla 1 con los aspectos más relevantes del espacio aéreo controlado y no controlado y sus principales características.

	Clase	Tipo de vuelo	Control/ Información de tráfico aéreo
Espacio aéreo controlado	A	IFR	- Control positivo por parte de ATC. - Exigencia de comunicación en ambos sentidos.
	B, C, D	IFR	- Control positivo por parte de ATC. - Exigencia de comunicación en ambos sentidos.
		VFR	- Control positivo por parte de ATC. - Exigencia de comunicación en ambos sentidos.
	E	IFR	- Control positivo por parte de ATC. - Exigencia de comunicación en ambos sentidos.
VFR		- No exigencia de control ni comunicación - Se recomienda escucha.	
Espacio aéreo no controlado	F, G	IFR	- Deben poder establecer comunicación con las dependencias de tránsito aéreo.
		VFR	- Voluntariamente se puede establecer comunicación con dependencias de tránsito aéreo e informar de la posición.

Tabla 1: Requerimientos de comunicación con Control de tráfico aéreo (ATC) o los servicios de información de vuelo (FIS) según el tipo de vuelo y de espacio aéreo en el que se realice. [11]

4.2. Zonas Obligatorias de Radio (RMZ), Transpondedor (tmz) y Plan de vuelo (FPMZ)

Existen, asimismo, zonas donde los equipos de radiocomunicaciones son obligatorios. Dichas zonas se denominan Zonas Obligatorias de Radio (*“Radio Mandatory Zones”*, RMZ). Según se recoge en la normativa de la Unión Europea, estas zonas están constituidas por zonas del espacio aéreo de tipos E, F, G para vuelos IFR y F, G para vuelos VFR y quedan definidas por la autoridad competente. En ellas, es requisito necesario mantenerse a la escucha de la comunicación por voz que llegue desde tierra, así como el establecimiento de comunicación en ambos sentidos si la operación lo requiere, proporcionando información por parte del piloto relativa al vuelo que se esté ejecutando antes de la entrada en estas zonas. ¹

Igualmente, existen Zonas Obligatorias de Transpondedor (*“Transponder Mandatory Zone”*, TMZ), también designadas por la autoridad competente. En ellas, es necesario llevar a bordo transpondedores tipo SSR que puedan operar en modo A, C o S.

Tanto las zonas obligatorias de radio como las de transpondedor pueden pertenecer al espacio aéreo controlado o al no controlado. En consecuencia, los operadores de RPAS

¹Reglamento de la UE, apartado SERA.6005 (M7, a)

deben ser conscientes que su existencia a la hora de realizar los vuelos, con el fin de equipar la aeronave convenientemente.

Ambas zonas requieren, en resumen, la incorporación de equipamiento durante el vuelo que no es necesario emplear en otras zonas del espacio aéreo, lo cual acaba limitando, significativamente en el caso de los RPAS, las capacidades de determinados modelos de realizar vuelos en esas zonas, además de reducir su carga de pago. ²

Además, el Reglamento del Aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea (SERA) ³, así como en el Real Decreto 1180/2018 contemplan la existencia de otro tipo de zonas denominadas Zonas de presentación obligatoria de plan de vuelo (FPMZ). La AESA permite realizar de manera telemática este tipo de solicitudes desde su página web. [12]

En la Figura 4.3 se representan estas tres zonas dentro de las regiones de información de vuelo (FIR) de Madrid y Barcelona mediante el uso de la aplicación ENAIRE Insignia, disponible para su libre consulta por los particulares y usuarios. Se puede observar, como se ha comentado más arriba, que estas zonas no necesariamente se encuentran dentro del espacio aéreo controlado.

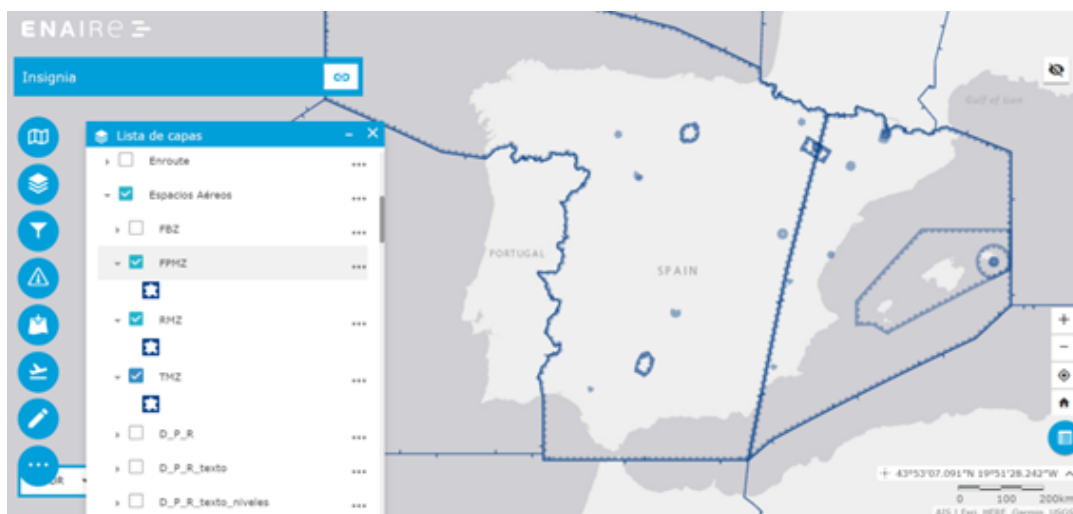


Figura 4.3: Representación de RMZ, TMZ y FPMZ dentro de los FIR de Madrid y Barcelona. Aplicación de Enaire Insignia. [7]

4.3. Zonas no permitidas

Por lo que se refiere a otras zonas especiales del espacio aéreo que se deben contemplar a la hora de confeccionar un plan de vuelo, se han previsto zonas en las que, o bien está

²Reglamento de la UE, apartado SERA.6005 (M7, b)

³Reglamento de la UE, apartado SERA.4001

prohibida su entrada o bien es preciso recabar un permiso previo para acceder a ellas. Estas regiones pueden estar clausuradas de manera permanente o temporal. Generalmente, cuando no se permite el vuelo durante un periodo de tiempo determinado, se suele indicar en la información aeronáutica la franja horaria en que se encuentra vigente la prohibición de acceso, así como las altitudes a las que afecta. En este sentido, se pueden diferenciar tres principales categorías:

- **Zonas peligrosas.** Se trata de regiones dentro de las cuales pueden desarrollarse de manera temporal actividades peligrosas que comprometan la seguridad de la operación.
- **Zonas restringidas.** A estas zonas, control de tráfico aéreo únicamente autoriza la entrada a ciertas aeronaves. Se trata de regiones que no están operativas para el resto de los vuelos de manera temporal porque en ellas se pueden estar realizando otro tipo de actividades tales como vuelos de prueba o vuelos militares.
- **Zonas prohibidas.** A tipo de zonas no está permitido su acceso por cuestiones de seguridad nacional y están permanentemente clausuradas.

En la Figura 4.4, por ejemplo, se representan zonas DPR dentro del FIR de Canarias donde aparece como zona prohibida el Parque Nacional del Teide. El sobrevuelo en esta espacio natural está permanentemente prohibido para aeronaves tripuladas y para los usuarios de RPAS por motivos de conservación. Por otro lado, al sur del archipiélago se puede observar una zona de gran extensión dedicada a actividades militares, constituyendo una zona restringida.

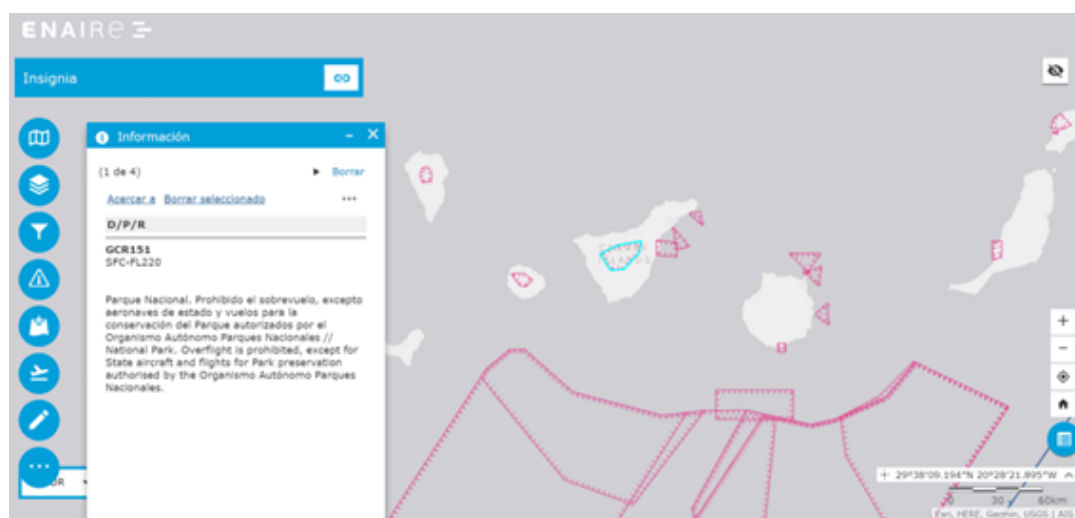


Figura 4.4: Ejemplo de zonas protegidas y prohibidas en el FIR de Canarias. Aplicación de ENAIRE Insignia. [7]

Estas tres zonas ordinariamente pertenecen a la región del espacio aéreo inferior y, por tanto, al FIR (“Flight Information Region”, por debajo de FL245), pero también algunas pueden afectar a regiones del espacio aéreo superior y, al UIR (“Upper Information Region”). Lógicamente, estos tres tipos de zonas no pertenecen al espacio aéreo controlado. [13]

Como se puede observar, tanto las zonas peligrosas como las prohibidas están definidas de manera temporal, por lo que, pasado un tiempo, es posible su reapertura a los operadores de RPAS. Por esta razón, resulta de vital importancia que los operadores, a la hora de realizar su plan de vuelo, sean conscientes de cuáles serán las regiones peligrosas, restringidas y prohibidas durante el periodo de tiempo en el que se lleva a cabo la operación.

Con este objetivo, se debe hacer uso del sistema NOTAM (“Notice to Airmen”). ENAIRE pone al servicio de pilotos y operadores de RPAS las herramientas para la consulta de NOTAM donde se puede acceder a toda esta información. [14]

Además, ENAIRE dispone de la aplicación Insignia y ENAIRE drones, en las que se delimitan las zonas peligrosas, restringidas y prohibidas, en el primero de los casos con carácter general para todo tipo de aeronaves y en el segundo circunscrito al vuelo de UAS. A continuación, en las Figura 4.5 y Figura 4.6, se recogen ejemplos de la representación de este tipo de zonas.

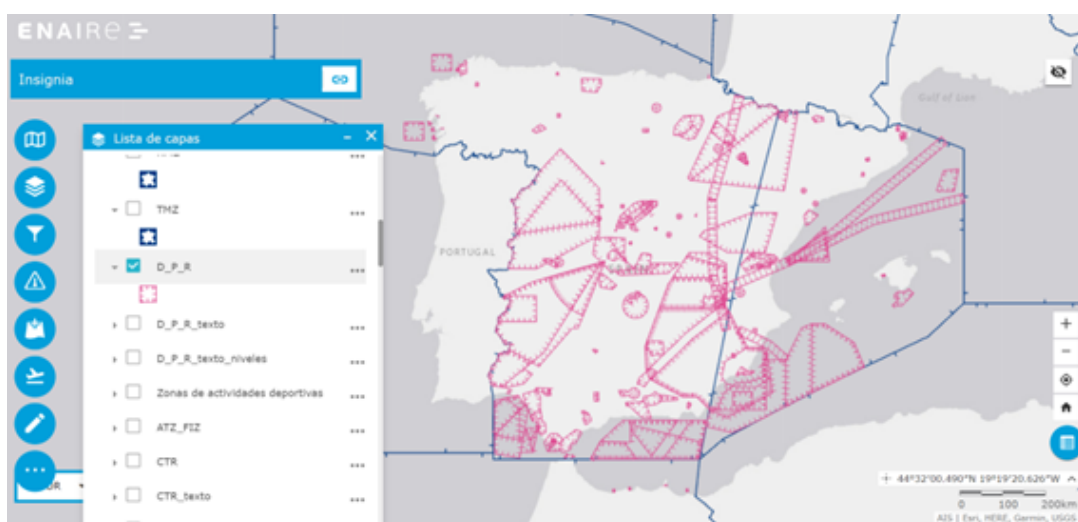


Figura 4.5: Representación de las Zonas DPR en los FIR de Madrid y Barcelona obtenidos a través de la aplicación Insignia de ENAIRE. [7]

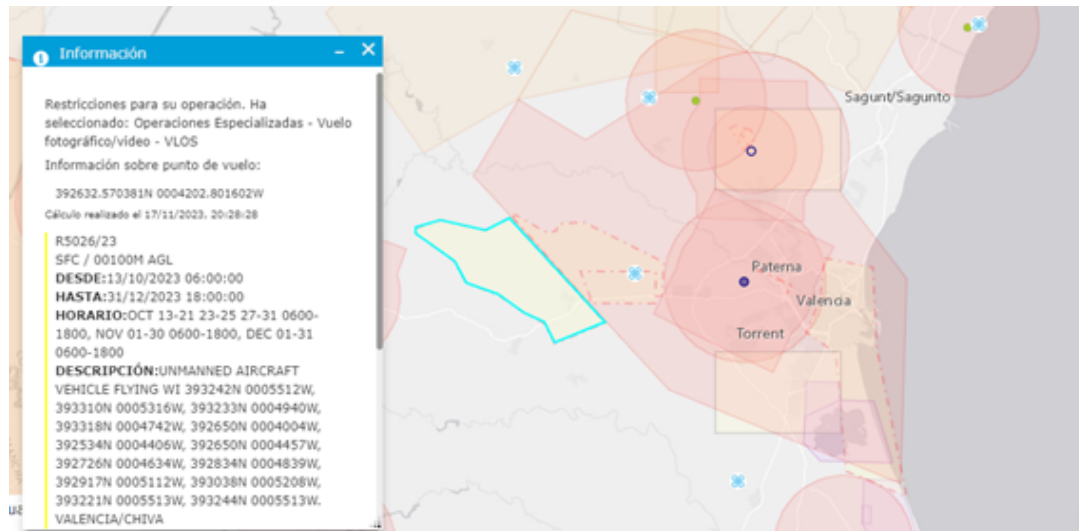


Figura 4.6: Ilustración de una zona restringida del espacio aéreo durante un periodo de tiempo determinado. En este caso, desde las 6 horas del día 13/11/2023 hasta las 18 horas del día 31/12/2023. [15]

5. Aspectos Regulatorios y Técnicos

5.1. Marco legislativo

Es preciso determinar el cuadro normativo que rige en la utilización y desarrollo de sistemas de aeronaves no tripuladas. Para ello se van a analizar tres marcos, el internacional, el europeo y el nacional para lograr concretar la materia sobre la que versa el presente trabajo.

5.1.1. Marco internacional

6.1.1.1. Agencias internacionales. OACI

El marco internacional viene determinado por el papel de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI o ICAO en sus siglas en inglés: “The International Civil Aviation Organization”).

En 1944, cerca de 50 Estados entendieron que, en el marco de la Segunda Guerra Mundial, constituía una tarea prioritaria establecer una serie de principios y directrices para un desarrollo “seguro y ordenado”⁴ de la aviación civil internacional como herramienta para promover el acercamiento y la cooperación entre las naciones con la intención de alcanzar un clima de paz mundial⁵. Reunidos en Chicago el 7 de diciembre de 1944 los Estados Contratantes, que en la actualidad ascienden a 193 [16], firmaron el Convenio sobre Aviación Civil Internacional (entre ellos España [17]).

Para velar por el cumplimiento del Convenio se crea la Organización de Aviación Civil Internacional en la Segunda Parte de dicho instrumento internacional, en concreto en los artículos 43 y siguientes, con la misión de mejorar y estimular el desarrollo de la navegación aérea en aras de la seguridad y del estímulo social y económico de los pueblos del mundo, poniendo el énfasis en los fines de carácter pacífico que deben guiar el desenvolvimiento del transporte aéreo en el contexto internacional⁶, así como más modernamente lograr un desarrollo sostenible del sistema de aviación internacional civil, constituir un foro acreditado de discusión y análisis y fomentar la cooperación de los Estados contratantes.

⁴Preámbulo del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Chicago, 1944): “Considerando que el desarrollo futuro de la aviación civil internacional puede contribuir poderosamente a crear y a preservar la amistad y el entendimiento entre las naciones y los pueblos del mundo, mientras que el abuso de la misma puede llegar a constituir una amenaza a la seguridad general; Considerando que es deseable evitar toda disensión entre las naciones y los pueblos del mundo y promover entre ellos la cooperación de que depende la paz del mundo; Por consiguiente, los Gobiernos que suscriben, habiendo convenido en ciertos principios y arreglos, a fin de que la aviación civil internacional pueda desarrollarse de manera segura y ordenada y de que los servicios internacionales de transporte aéreo puedan establecerse sobre una base de igualdad de oportunidades y realizarse de modo sano y económico;”

⁵Preámbulo del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Chicago, 1944).

⁶Art. 44 Convenio sobre Aviación Civil Internacional.

[18]

Su labor se centra, en la elaboración de Anexos al propio instrumento, Manuales Técnicos y Circulares ⁷, así como la adopción de recomendaciones inspiradas en los principios del Convenio que se han visto recogidas en normativa europea y nacional como más tarde se verá. La clave de la Organización es la “armonización” [19] o uniformización de la normativa internacional en cuanto afecta a la aeronavegación civil.

Ejemplo de este fenómeno lo encontramos en la regulación de la OACI sobre UAV. En 2005 se aprecia el primer antecedente de este fenómeno, pues ese año la Comisión de Aeronavegación promovió consultas y mostró su preocupación sobre los peligros que las aeronaves no tripuladas podrían plantear para la seguridad de la aviación civil. En 2006 se descartó la elaboración de normas específicas en el marco internacional de la Organización, limitando la labor de la misma a la creación de SARPS, esto es, normas o métodos recomendados, que no resultarían vinculantes ni de preceptiva aplicación. En este empeño por tutorizar una incipiente regulación sobre UAVS se publicó en 2011 la Circular OACI 328-an/190 [9] que versa sobre sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS).

Entre los propósitos de la Circular se encuentra el de “informar a los Estados sobre el surgimiento de la perspectiva OACI respecto de la integración de los UAS en el espacio aéreo no segregado y en los aeródromos”. ⁸

Llama la atención que el Convenio de Chicago de 1944 previera ya desde su redacción, aún en la primera mitad del siglo XX, la posible existencia y utilización de “Aeronaves sin piloto”. El artículo 8 del Convenio señala que “*Ninguna aeronave capaz de volar sin piloto volará sin él sobre el territorio de un Estado contratante, a menos que se cuente con autorización especial de tal Estado y de conformidad con los términos de dicha autorización. Cada Estado contratante se compromete a asegurar que los vuelos de tales aeronaves sin piloto en las regiones abiertas a la navegación de las aeronaves civiles sean controlados de forma que se evite todo peligro a las aeronaves civiles*” ⁹. Este concepto parecía diseñado para referirse a aeronaves que autónomamente pudieran operar sin necesidad de ningún tipo de intervención humana. No obstante, la Circular OACI 328-an/190 va más allá y realiza una distinción: señala que un vehículo aéreo no tripulado (UAV) constituye la clasificación más amplia que coincide con el concepto de “Aeronaves sin piloto” del Convenio de Chicago (ajustándose a lo dispuesto en su art. 8). A su vez, esta categoría de UAV se subdivide en “RPA” o “aeronaves pilotadas a distancia” y en “aeronaves plenamente autónomas”, de los cuales sólo los RPA tienen visos de integrarse en el espacio aéreo

⁷Vassallo, Carlos María (2016). La adaptación de la legislación aeronáutica ante el desarrollo tecnológico de los RPAS, página 4. [16]

⁸Punto 1.6, Capítulo 1 Circular OACI 328-an/190.

⁹Art. 8 Convenio sobre Aviación Civil Internacional.

no segregado.¹⁰ La explicación la encontramos en los peligros para los operadores de la aviación civil, cuyas actividades se desarrollan en dicho espacio aéreo no segregado, de compartirlo con aeronaves autónomas no pilotadas ni controladas ni siquiera a distancia, visto el estado de la técnica en el año de redacción de la Circular.

En consecuencia, se ha hecho una interpretación extensiva del concepto “Aeronaves sin piloto”¹¹ del Convenio de Chicago de 1944 para incluir en él los supuestos en los que existe piloto, está a los mandos de la aeronave, pero la dirige a distancia. De esta manera se revisa y se adecúa a los nuevos tiempos la obsoleta previsión respecto de este tipo de aeronaves en el ámbito internacional.

A lo largo de la Circular se abordan aspectos como la seguridad y prevención de colisiones, comunicaciones, transporte, búsqueda y salvamento, aspectos técnicos como la certificación, matrícula o licencias, . . . que sirven de guía para regulaciones más pormenorizadas por parte de los Estados o de entidades supranacionales como la Unión Europea.

Finalmente, y dado que se trata de un sector en rápido avance, la OACI a finales del año 2022 organizó eventos como el “DRON ENABLE” [20] con el objetivo de evaluar las innovaciones que se están produciendo en el ámbito de los sistemas de aeronaves no tripuladas, y dibujar escenarios futuros que puedan prever regulaciones completas, actualizadas y vanguardistas en atención a los cambios que ya se están dibujando en el horizonte.

5.1.2. Marco regulatorio europeo

El marco regulatorio europeo de los UAVs viene dominado por dos Reglamentos relativamente recientes:

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.[21]

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. [22]

Como Reglamentos que son, tienen alcance general y son directamente aplicables en todos los Estados miembros de la UE¹², por lo que es obligatorio y produce efectos en todos sus elementos desde su entrada en vigor sin necesidad de trasposición a la legislación

¹⁰Puntos 2.1-2.4, Capítulo 2 Circular OACI 328-an/190.

¹¹Vassallo, Carlos María (2016). La adaptación de la legislación aeronáutica ante el desarrollo tecnológico de los RPAS, página 7. [16]

¹²Art. 288 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea.

interna como ocurre con las Directivas.

El Reglamento (UE) 2019/947 en su artículo 2 y el art. 3 del Reglamento (UE) 2019/945 remiten a las definiciones del artículo 3 del Reglamento (UE) 2018/1139 sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por el que se crea una Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea[23], que a su vez siguen las directrices marcadas por la OACI. Define como UA (unmanned aircraft) o ANT en español (aeronave no tripulada) a “cualquier aeronave que opere o esté diseñada para operar de forma autónoma o para ser pilotada a distancia sin un piloto a bordo”¹³ y como UAS/SANT (unmanned aircraft system/sistemas de aeronaves no tripuladas) a la “aeronave no tripulada y el equipo para controlarla de forma remota”.¹⁴

En primer lugar, llama la atención el nuevo régimen de identificación de marcado por clases de UAS, que implica el cumplimiento de una serie de condiciones y unas características concretas:

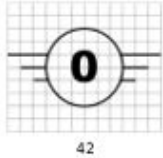
CLASES	REQUISITOS
 <p data-bbox="341 1507 363 1525">42</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="464 1267 895 1301">– MMD < 250 g (incluida carga útil). <li data-bbox="464 1301 1034 1335">– Velocidad máxima 19 m/s en vuelo horizontal. <li data-bbox="464 1335 778 1368">– Altura máxima ≤ 120 m. <li data-bbox="464 1368 1321 1435">– Controlable de manera segura por el piloto a distancia (instrucciones del fabricante). <li data-bbox="464 1435 1278 1469">– Diseño y fabricación del producto dirigido a la evitación de lesiones. <li data-bbox="464 1469 954 1503">– Alimentación exclusivamente eléctrica. <li data-bbox="464 1503 1078 1536">– Hasta 50 m del piloto a distancia (modo sígueme). <li data-bbox="464 1536 975 1570">– Comercialización con manual de usuario. <li data-bbox="464 1570 1321 1637">– Incluir nota informativa EASA sobre limitaciones y obligaciones aplicables.

Figura 5.1: Requisitos para el marcado de clase 0.

¹³Art. 3 Reglamento (UE) 2019/945.

¹⁴Art. 2 Reglamento (UE) 2019/947.

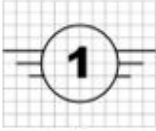
 <p>43</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Energía transmitida a cabeza humana en caso de impacto < 80 J o MMD < 900 g (incluida carga útil). - Velocidad máxima 19 m/s en vuelo horizontal. - Altura máxima ≤ 120 m. - Controlable de manera segura por el piloto a distancia (instrucciones del fabricante). - Resistencia mecánica exigida sin roturas ni deformaciones. - Diseño y fabricación del producto dirigido a la evitación de lesiones. - Previsión de supuestos de pérdida de enlace de datos. - Nivel de potencia sonora ponderado A garantizado L_{WA}. - Alimentación exclusivamente eléctrica. - Número de serie físico único. - Identificación a distancia directa (número de registro, protocolo de transmisión de datos, ...). - Sistema de geoconsciencia. - Interacción entre sistema de control de vuelo y sistema de limitación de acceso a zonas del espacio aéreo de tenerlo. - Sistemas de alerta por baja batería. - Estar equipado con luces que permitan la controlabilidad y visibilidad. - Hasta 50 m del piloto a distancia (modo sígueme). - Comercialización con manual de usuario. - Incluir nota informativa EASA sobre limitaciones y obligaciones aplicables.
---	--

Figura 5.2: Requisitos para el marcado de clase 1.

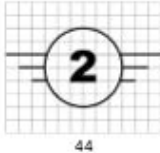
	<ul style="list-style-type: none"> - MMD < 4 kg (incluida carga útil). - Altura máxima ≤ 120 m. - Controlable de manera segura por el piloto a distancia (instrucciones del fabricante). - Resistencia mecánica exigida sin roturas ni deformaciones. - Si ANT cautiva: anclaje con longitud de tracción < 50 m y resistencia mecánica mínima. - Diseño y fabricación del producto dirigido a la evitación de lesiones. - Previsión de supuestos de pérdida de enlace de datos. - Enlace de datos protegido contra accesos no autorizados. - Modo de baja velocidad ≤ 3 m/s velocidad máxima de crucero. - Nivel de potencia sonora ponderado A garantizado L_{WA}. - Alimentación exclusivamente eléctrica. - Número de serie físico único. - Identificación a distancia directa (número de registro, protocolo de transmisión de datos, ...). - Sistema de geoconsciencia. - Interacción entre sistema de control de vuelo y sistema de limitación de acceso a zonas del espacio aéreo de tenerlo. - Sistemas de alerta por baja batería. - Estar equipado con luces que permitan la controlabilidad y visibilidad. - Comercialización con manual de usuario. - Incluir nota informativa EASA sobre limitaciones y obligaciones aplicables.
---	--

Figura 5.3: Requisitos para el marcado de clase 2.

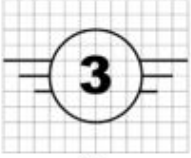
 <p>45</p>	<ul style="list-style-type: none"> - MTOM < 25 kg (incluida carga útil). - Dimensión característica máxima < 3 m. - Altura máxima \leq 120 m. - Diseño y fabricación del producto dirigido a la evitación de lesiones. - Si ANT cautiva: anclaje con longitud de tracción < 50 m y resistencia mecánica mínima. - Previsión de supuestos de pérdida de enlace de datos. - Nivel de potencia sonora ponderado A garantizado L_{WA}. - Alimentación exclusivamente eléctrica. - Número de serie físico único. - Identificación a distancia directa (número de registro, protocolo de transmisión de datos, ...). - Sistema de geoconsciencia. - Interacción entre sistema de control de vuelo y sistema de limitación de acceso a zonas del espacio aéreo de tenerlo. - Enlace de datos protegido contra accesos no autorizados. - Sistemas de alerta por baja batería. - Estar equipado con luces que permitan la controlabilidad y visibilidad. - Comercialización con manual de usuario. - Incluir nota informativa EASA sobre limitaciones y obligaciones aplicables.
---	---

Figura 5.4: Requisitos para el marcado de clase 3.

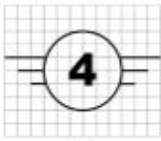
 <p>46</p>	<ul style="list-style-type: none"> - MTOM < 25 kg (incluida carga útil). - Controlable de manera segura por el piloto a distancia (instrucciones del fabricante). - No disponer de modo control automático (excepciones en caso de estabilización y asistencia por pérdida de conexión). - Comercialización con manual de usuario. - Incluir nota informativa EASA sobre limitaciones y obligaciones aplicables.
---	--

Figura 5.5: Requisitos para el marcado de clase 4.

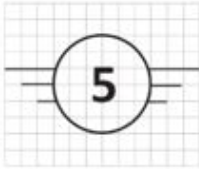
 <p>47</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Requisitos C3, salvo: <ul style="list-style-type: none"> * Altura máxima ≤ 120 m. * Sistema de geoconsciencia. - Ser aeronave de ala no fija, salvo si está anclado. - Sistema de geoconsciencia: requisitos C3. - Proporcionar información al piloto sobre la altura durante el vuelo. - Modo de baja velocidad ≤ 5 m/s velocidad máxima. - Proporcionar medios al piloto a distancia para el aterrizaje. - Proporcionar medios para la comprobación de la calidad del enlace de datos. - Instrucciones del fabricante acerca de los medios para terminar el vuelo. - Posibilidad de convertir un UAS clase C3 en una clase C5 con kit de accesorios. - Identificación de los accesorios C5 + Instrucciones del fabricante de instalación y funcionamiento.
---	--

Figura 5.6: Requisitos para el marcado de clase 5.

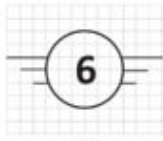
 <p>48</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Requisitos C3, salvo: <ul style="list-style-type: none"> * Altura máxima ≤ 120 m. * Alimentación exclusivamente eléctrica. * Sistema de geoconsciencia. - Velocidad máxima 50 m/s en vuelo horizontal. - Si sistema de geoconsciencia: requisitos C3. - Proporcionar información sobre posición geográfica UA, velocidad y altura. - Proporcionar medios para evitar superar los límites horizontales y verticales. - Proporcionar medios al piloto a distancia para el aterrizaje. - Proporcionar medios para programar la trayectoria UA. - Proporcionar medios para la comprobación de la calidad del enlace de datos. - Instrucciones del fabricante acerca de los medios para terminar el vuelo.
---	---

Figura 5.7: Requisitos para el marcado de clase 6.

Se pueden señalar los siguientes ejemplos de drones por categoría:

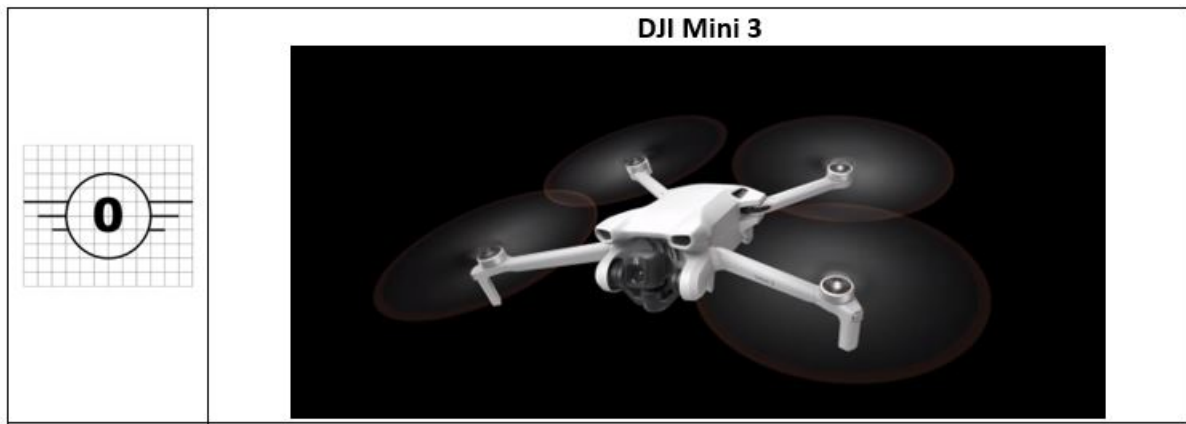


Figura 5.8: Ejemplo de dron con marcado de clase 0. [24]



Figura 5.9: Ejemplo de dron con marcado de clase 1. [25]



Figura 5.10: Ejemplo de dron con marcado de clase 2. [26]



Figura 5.11: Ejemplo de dron con marcado de clase 3. [27]



Figura 5.12: Ejemplo de dron con marcado de clase 4. [28]

A continuación, se presentan gráficas comparativas de las especificaciones de los diferentes modelos de dron representativos de cada marcado de clase:

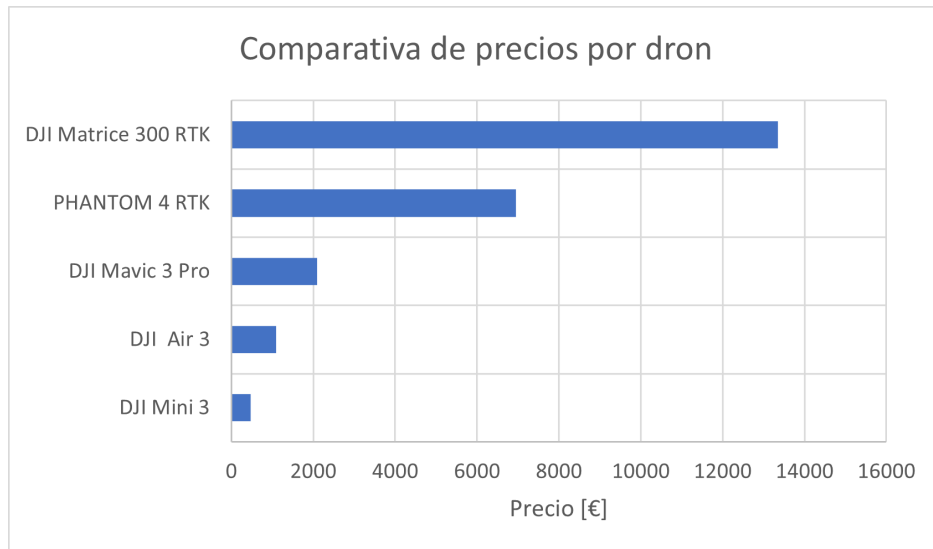


Figura 5.13: Comparativa de precios por dron. [24] [25] [26] [27]

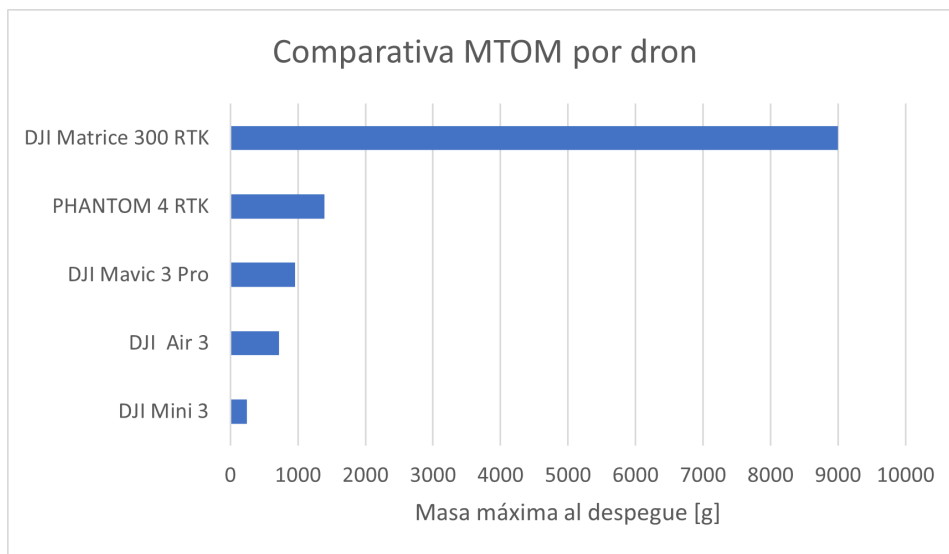


Figura 5.14: Comparativa MTOM por dron. [24] [25] [26] [27]

De las anteriores gráficas se observa la misma tendencia tanto para la evolución del precio como de masa máxima al despegue que aumenta cuanto mayor es el mercado de clase. Esto se debe a que el mercado de clase responde a mayores capacidades operativas del dron y, por lo general, a mayor sofisticación tecnológica. Cabe destacar que el peso del dron DJI Matrice 300 RTK (mercado de clase C4, empleado en operaciones industriales, operaciones de rescate y por cuerpos policiales) es muy superior a los restantes drones de mercado de clase inferior.

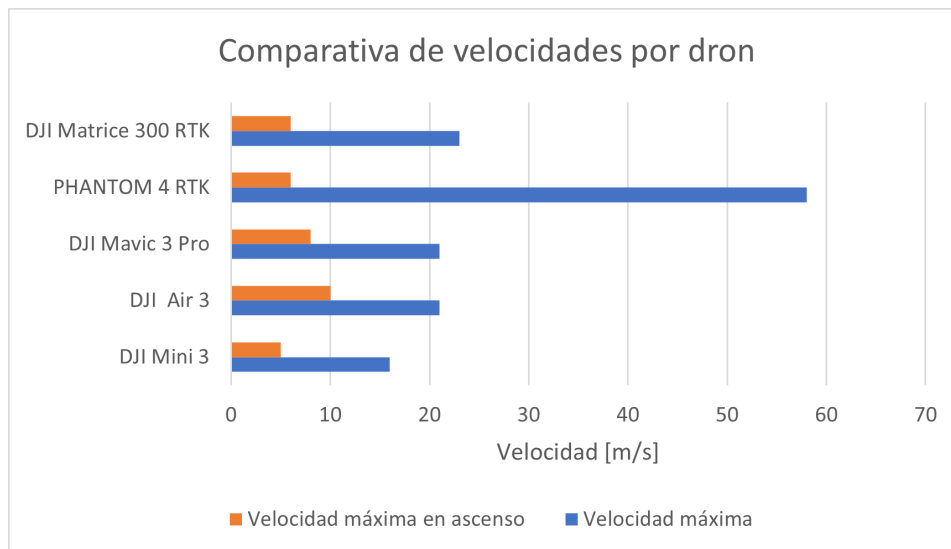


Figura 5.15: Comparativa de velocidades por dron. [24] [25] [26] [27]

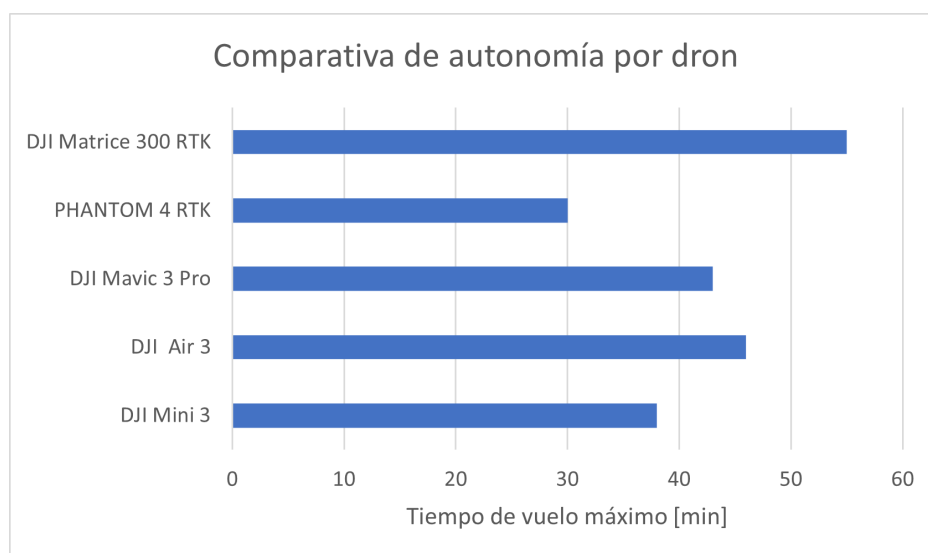


Figura 5.16: Comparativa de autonomía por dron. [24] [25] [26] [27]

Por su parte, la velocidad y la autonomía de estos UAS no siguen un patrón por marcado de clases, pudiendo encontrar drones de categorías inferiores con autonomías más que aceptables y velocidades máximas similares para drones de clase C1, C2 y C4, como ocurre entre el DJI Air 3, DJI Mavic 3 Pro y el DJI Matrice 300 RTK. También es de destacar la velocidad máxima alcanzada por el dron PHANTOM 4 RTK (drón ampliamente utilizado para cartografía de alta precisión) en comparación con el modelo de mercado de clase superior. En cuanto a la velocidad máxima de ascenso, sigue una tendencia algo diferente a la velocidad máxima, destacando el dron de la categoría C1 DJI Air 3, utilizado para la captación de imágenes y vídeo.

Existen, por tanto, modelos con marcado de clase C0 y C1 con prestaciones más que aceptables, lo que unido a su bajo precio y a sus menores restricciones para su uso, los hacen bastante atractivos en el mercado de UAS.

Continuando con el análisis de la normativa europea, hay que tener muy presente que los SANT que tienen la consideración de juguetes además de cumplir con los requerimientos de la Directiva 2009/48/CE¹⁵, estarán sujetos a las disposiciones del Reglamento (UE) 2019/945¹⁶. Sin embargo, en ocasiones se exime a esos SANT de ciertos requerimientos como por ejemplo el de la tensión nominal de los SANT clase C0¹⁷ o la edad mínima para pilotar los mismos de conformidad con el art. 9 del Reglamento (UE) 2019/947, que se sitúa en los dieciséis años para los UAS que no tengan la consideración de juguete y no establece mínimos para los sistemas que se rigen por la Directiva 2009/48/CE, en consonancia con su utilización mayoritariamente por usuarios menores de edad.

Otra de las principales novedades que incluyen los Reglamentos la encontramos en la clasificación operacional de UAS. El uso de los sistemas de aeronaves no tripuladas, sea éste recreativo o profesional, ya no es determinante (como sí lo era en la legislación anterior), habiendo sido superada por una división que pone el foco en la seguridad de las operaciones de los UAS. Así se distinguen actualmente tres categorías operacionales:

“**Categoría abierta**”, en la que las operaciones de UAS no requieren previa autorización ni declaración operacional de su operador por revestir un riesgo bajo. A su vez en la “categoría abierta” se distinguen tres subcategorías A1, A2 y A3, reguladas en la Parte A Anexo Reglamento (UE) 2019/947, que establecen requisitos progresivamente más exigentes de carácter técnico, referentes a necesidades de formación, prohibiciones de realizar operaciones en situaciones potencialmente peligrosas para las personas o para los bienes, que condicionan en su conjunto el manejo de los SANT por los pilotos a distancia.

“**Categoría específica**”: se precisa de autorización por parte de la autoridad competente (implica un riesgo medio). También se ha introducido una novedad al Reglamento (UE) 2019/947 en el año 2020, al preverse escenarios estándar a los que los operadores se podrán acoger presentando una declaración operacional. La autoridad competente diseña situaciones predeterminadas para las que se han realizado estudios de seguridad y se han previsto las medidas de atenuación. A través de la declaración operacional el operador afirma reunir los requisitos de riesgo y mitigación previstos para acogerse a escenarios estándar. Se han diseñado dos escenarios:

- **STS- 01**: aplicable a vuelos dentro del alcance visual sobre zonas terrestres controla-

¹⁵Directiva 2009/48/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de junio de 2009, sobre la seguridad de los juguetes (DO L 170 de 30.6.2009, p. 1).

¹⁶Punto (5) Reglamento (UE) 2019/945.

¹⁷Parte 1 Anexo Reglamento (UE) 2019/945 in fine.

das en entornos poblados¹⁸. Los UAs para este escenario deberán tener un marcado de clase C5.

- **STS-02**: operaciones fuera del alcance visual con observadores del espacio aéreo sobre una zona terrestre controlada en un entorno poco poblado.¹⁹ Los UAs para este escenario deberán tener un marcado de clase C6.

En caso contrario, esto es, de no ajustarse a tales escenarios estándar que permiten simplificar las operaciones en la categoría específica, así como descargar a la autoridad autorizante, resulta obligatorio recabar autorización conforme al art. 5 del Reglamento (UE) 2019/947.²⁰

“**Categoría certificada**”: exige certificación del operador y licencia al piloto a distancia²¹, de forma asimilable a la aviación tripulada[29] (riesgo elevado).

Los requisitos para entender que un SANT se encuentra incluido dentro de cada una de las anteriores categorías se pueden ver reflejados en la siguiente tabla resumen:

¹⁸El escenario estándar 1 («STS-01») comprende las operaciones realizadas dentro del alcance visual («VLOS»), a una altura máxima de 120 m sobre una zona terrestre controlada en un entorno poblado, utilizando un UAS de clase CE C5. Punto (3) Reglamento de Ejecución (UE) 2020/639 de la Comisión de 12 de mayo de 2020 por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 en lo que concierne a los escenarios estándar de operaciones ejecutadas dentro o más allá del alcance visual.

¹⁹El escenario estándar 2 («STS-02») comprende las operaciones que podrían realizarse más allá del alcance visual («BVLOS»), con la aeronave no tripulada a una distancia no superior a 2 km del piloto a distancia, en presencia de observadores del espacio aéreo, a una altura máxima de 120 m sobre una zona terrestre controlada en un entorno poco poblado, utilizando un UAS de clase CE C6. Punto (4) Reglamento de Ejecución (UE) 2020/639.

²⁰Art. 5.5 Reglamento (UE) 2019/947 a sensu contrario.

²¹Art. 3 Reglamento (UE) 2019/947.

CATEGORÍA	REQUISITOS		
Abierta ²²	a) MTOM <25 kg b) Distancia segura respecto de personas. c) Prohibición de sobrevolar concentraciones de personas. d) Dentro del alcance visual del piloto, salvo excepciones parte A Anexo. e) Altura máxima ≤ 120 m. - Excepciones en supuestos de obstáculos (margen de 15 m de altura máxima) ²³ . - Si MTOM <10 kg altura máxima ≤ 120 m por encima altura del piloto a distancia. ²⁴ f) Prohibición de transporte de mercancías peligrosas o materiales. g) Subdivisión en Subcategorías A1, A2 y A3 (conforme a parte A del Anexo).		
Subcategorías de la categoría abierta	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;">A1²⁵</td> <td style="padding-left: 10px;"> 1) Prohibición de sobrevolar concentraciones de personas y sobre personas no participantes. Excepciones para no participantes. 2) Reducción al mínimo del tiempo en que se sobrevuelen concentraciones en supuestos inesperados. 3) Hasta 50 m del piloto a distancia (modo sígueme). 4) Obligación de conocer el manual del usuario del fabricante. 5) Requisitos UAS clase C0 o C1. 6) UAS de clase C1: formación en línea + examen teórico. 7) MTOM <250 g (incluida carga útil). 8) Velocidad operativa máxima <19 m/s. </td> </tr> </table>	A1 ²⁵	1) Prohibición de sobrevolar concentraciones de personas y sobre personas no participantes. Excepciones para no participantes. 2) Reducción al mínimo del tiempo en que se sobrevuelen concentraciones en supuestos inesperados. 3) Hasta 50 m del piloto a distancia (modo sígueme). 4) Obligación de conocer el manual del usuario del fabricante. 5) Requisitos UAS clase C0 o C1. 6) UAS de clase C1: formación en línea + examen teórico. 7) MTOM <250 g (incluida carga útil). 8) Velocidad operativa máxima <19 m/s.
A1 ²⁵	1) Prohibición de sobrevolar concentraciones de personas y sobre personas no participantes. Excepciones para no participantes. 2) Reducción al mínimo del tiempo en que se sobrevuelen concentraciones en supuestos inesperados. 3) Hasta 50 m del piloto a distancia (modo sígueme). 4) Obligación de conocer el manual del usuario del fabricante. 5) Requisitos UAS clase C0 o C1. 6) UAS de clase C1: formación en línea + examen teórico. 7) MTOM <250 g (incluida carga útil). 8) Velocidad operativa máxima <19 m/s.		

²²Art. 4 Reglamento (UE) 2019/947.

²⁵Parte A Anexo Reglamento (UE) 2019/947. UAS.OPEN.020 Operaciones de UAS de la subcategoría A1.

	<p>1) Prohibición de volar por encima de personas no participantes (a distancia horizontal de >30 m de ellas). - Excepción a mínimo de 5 m a modo baja velocidad en función de condiciones meteorológicas, rendimiento UAS y aislamiento zona sobrevolada.</p> <p>2) Obligación de conocer el manual del usuario del fabricante.</p> <p>3) Certificado de competencia de piloto a distancia: a. Formación en línea. b. Examen teórico. c. Completar formación autopráctica condiciones A3. d. Examen teórico adicional atenuaciones técnicas y operacionales del riesgo en tierra.</p> <p>4) Requisitos UAS Clase C2.</p>
	<p>1) Zonas sin peligro para personas no participantes durante todo el período de la operación de UAS.</p> <p>2) Distancia horizontal segura ≥ 150 m de zonas residenciales, comerciales, industriales o recreativas.</p> <p>3) Curso de formación en línea.</p> <p>4) Examen teórico.</p> <p>5) MTOM <25 kg (incluida carga útil).</p> <p>6) Requisitos UAS clase C2, C3 o C4.</p>
Específica ²⁸	<p>a) Supuestos de incumplimiento de algún requisito de la categoría abierta.</p> <p>b) Declaración operacional (escenarios estándar).</p> <p>c) Solicitud de autorización operacional²⁹ a autoridad competente del Estado Miembro de registro.</p> <p>d) Evaluación del riesgo + medidas de atenuación.³⁰</p> <p>e) Previsión de excepciones a la necesidad de autorización (e.g.: clubes o asociaciones de aeromodelismo con autorización previa³¹).</p> <p>f) Respeto a las limitaciones y requisitos operacionales de la autorización expedida³².</p>

²⁶Parte A Anexo Reglamento (UE) 2019/947. UAS.OPEN.020 Operaciones de UAS de la subcategoría A2.

²⁷Parte A Anexo Reglamento (UE) 2019/947. UAS.OPEN.040 Operaciones de UAS de la subcategoría A3.

²⁸Art. 5 Reglamento (UE) 2019/947

Certificada ³³	<ul style="list-style-type: none"> a) Dimensión característica UAS ≥ 3 m. b) Uso sobre concentraciones de personas. c) Diseño para el transporte de personas. d) Diseño para el transporte de mercancías peligrosas. e) Exige gran solidez para la atenuación de riesgos por accidente. f) Riesgo elevado apreciable por la autoridad competente que aconseja la certificación del UAS³⁴.
---------------------------	--

Tabla 2: Requisitos por categorías de SANT

El Reglamento (UE) 2019/947, que introduce la distinción más arriba reflejada, es aplicable a partir del 1 de julio de 2020³⁵, no obstante, en su art. 22 se prevén unas disposiciones transitorias que permiten la adaptación progresiva de los UAS a los requisitos operacionales del Reglamento. El marco transitorio otorga una moratoria que finalizará el 31 de diciembre de 2023³⁶ transcurrido un año desde la entrada en vigor del Reglamento para aquéllos SANT de la categoría abierta que no cumplan los requisitos 1 a 5 del Anexo del Art. 40 Reglamento (UE) 2019/945:

- SANT MTOM < 500 g + piloto a distancia con nivel de competencia definido por el Estado Miembro interesado + requisitos operacionales C1 + requisitos siguientes:
 1. Prohibición de sobrevolar concentraciones de personas y sobre personas no participantes. Excepciones para no participantes.
 2. Reducción al mínimo del tiempo en que se sobrevuelen concentraciones en supuestos inesperados.

- SANT MTOM < 2 kg + ≥ 50 m distancia horizontal mínima + piloto a distancia con nivel de competencia siguiente:
 1. Obligación de conocer el manual del usuario del fabricante.
 2. Certificado de competencia de piloto a distancia:
 - a) Formación en línea.
 - b) Examen teórico.
 - c) Completar formación autopráctica condiciones A3.
 - d) Examen teórico adicionales atenuaciones técnicas y operacionales del riesgo en tierra.

³³Art. 6 Reglamento (UE) 2019/947.

³⁵Art. 23.1 Reglamento (UE) 2019/947.

³⁶Art. 22 Reglamento (UE) 2019/947, modificado sucesivamente por el Reglamento Delegado (UE) 2020/1058 y por el Reglamento De Ejecución (UE) 2022/425.

- SANT MTOM > 2 kg y ≤ 25 kg + ≥ 50 m distancia horizontal mínima + piloto con formación en línea + examen teórico + requisitos C1 + requisitos operacionales siguientes:
 1. Zonas sin peligro para personas no participantes durante todo el período de la operación de UAS.
 2. Distancia horizontal segura ≥ 150 m de zonas residenciales, comerciales, industriales o recreativas.

Por otro lado, se permite la utilización de aquellos SANT que han tenido entrada en el mercado del sector con anterioridad al 1 de enero de 2024³⁷ y que no sean de fabricación privada con los siguientes límites:

- SANT subcategoría A1: MTOM < 250 g (incluida carga útil).
- SANT subcategoría A3: MTOM < 25 kg (incluidos carburante y carga útil).

Asimismo, se ha previsto un período transitorio para las autorizaciones, declaraciones y certificados concedidos, de manera que con fechas límites de 1 de enero de 2022 o 1 de enero de 2023, deberán ajustarse a los modelos y documentación previstos en los Reglamentos.³⁸

Las fechas de entrada en vigor de los Reglamentos tratados y de las disposiciones transitorias se han visto varias veces retrasados en el tiempo como consecuencia de situaciones de fuerza mayor como el COVID-19 que obligatoriamente iban a obstaculizar la correcta y progresiva adaptación a la nueva normativa europea, en perjuicio de los operadores, fabricantes y autoridades. Ejemplos de ello son el Reglamento de Ejecución (UE) 2020/746 de la Comisión, de 4 de junio de 2020, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 en lo que respecta al aplazamiento de las fechas de aplicación de determinadas medidas en el contexto de la pandemia de COVID—19; o el Reglamento De Ejecución (UE) 2022/425 de la Comisión de 14 de marzo de 2022 que modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 por lo que respecta al aplazamiento de las fechas de transición para la utilización de determinados sistemas de aeronaves no tripuladas en la categoría «abierta», así como la fecha de aplicación de los escenarios estándar para las operaciones ejecutadas dentro o más allá del alcance visual.

Finalmente se incorpora la obligación de registro de operadores de SANT y de los SANT certificados, debiendo incorporar y mantener los Estados Miembros sistemas de

³⁷Art. 20 Reglamento (UE) 2019/947.

³⁸Art. 21 Reglamento (UE) 2019/947.

registro³⁹ que permitan identificar a las personas físicas o jurídicas que operen UAS fomentando el intercambio de información entre Estados Miembros.

Será obligatorio el registro de los operadores de sistemas de la categoría específica con independencia de su masa y aquellos SANT que operan en la categoría abierta en estos supuestos⁴⁰:

- $MTOM \geq 250$ g / transferencia de energía cinética en supuesto de colisión > 80 J.
- Estar equipado con sensor capaz de captar datos personales, salvo que se trate de juguetes.⁴¹

Estos requisitos dan mucho juego pues se abren varios escenarios: [30]

En primer lugar, los operadores de UAS de categoría específica deben en todo caso registrarse en el Registro abierto por el Estado Miembro en cuestión y ello con independencia de su masa máxima al despegue y de si incluye o no sensores que permitan la captación de datos personales.

En segundo lugar, si el UA objeto de la operación opera en la categoría abierta, su operador deberá registrarse si se cumplen las condiciones más arriba indicadas. De esta forma, siempre que su masa máxima al despegue sea igual o superior a 250 g el registro será obligatorio, aunque no incluya sensores capaces de captar datos personales o aunque la energía cinética que transmita en caso de colisión a un ser humano no supere los 80 julios. Sin embargo, si su MTOM es inferior a 250 g (marcado de clase C0), también se impone al operador el deber de registro si la transferencia de energía cinética en supuesto de colisión es superior a 80 J (marcados de clase C2 o superior) o si incluye sensores de captación de datos personales. Ejemplos de estos casos de baja masa máxima al despegue con obligación de registro son:

Drones destinados a carreras o “racers” ligeros, que no incluyan sensores capaces de captar datos personales, y que puedan transmitir más de 80 J de transferencia cinética a un ser humano en supuestos de colisión. BetaFPV X-Knight 3 (XK3) es un dron de carreras con un peso aproximado de 126,7 g que puede alcanzar velocidades máximas superiores a los 90 km/h.

Teniendo en cuenta que el máximo de energía cinética es 80 J, es posible estimar la velocidad máxima de impacto a partir de la cual se superaría el límite y sería obligatorio el registro de sus operadores. Para ello, se toma el valor de masa máxima al despegue como dato de la masa para aplicar la fórmula, pues se trataría del caso más desfavorable.

³⁹Art. 14 Reglamento (UE) 2019/947.

⁴⁰Art. 14.5 Reglamento (UE) 2019/947.

⁴¹Directiva 2009/48/CE.

$$\begin{cases} \text{Energía cinética máxima permitida} \rightarrow E_{c_{\text{máx}}} = 80 \text{ J} \\ \text{masa máxima al despegue del dron} \rightarrow m_{\text{máx}} = 126.7 \text{ g} = 0.1267 \text{ kg} \end{cases} \quad (1)$$

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow E_{c_{\text{máx}}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{máx}} \cdot v^2 \rightarrow v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{c_{\text{máx}}}}{m_{\text{máx}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 80 \text{ J}}{0.1267 \text{ kg}}} = 35.54 \text{ m/s} = 127.93 \text{ km/h} \quad (2)$$

En este caso, no se llegaría a la velocidad límite con este modelo porque $90 \text{ km/h} < 127.93 \text{ km/h}$. Es importante tener en cuenta que este valor de velocidad límite de impacto es característica de cada dron, pues es función de la masa del mismo.

Resulta complicado pues encontrar drones de este tipo pues los UAS de competición o de carreras o bien presentan una masa máxima al despegue superior a 250 g o son tan ligeros que requerirían unas velocidades tan elevadas que, en caso de impacto, superarían los 80 J de energía cinética transmitida a una persona.

Dron DJI Mini 3 [31], con un peso de despegue de 248 g con batería estándar que incluye cámara de video y sensores de imagen.



Figura 5.17: Dron DJI Mini 3. [32]

Finalmente, los operadores de UAS (menores de edad en su mayoría) que tengan el carácter de juguete quedan excluidos de la obligación de registro en todo caso, por estimarse que el riesgo en su uso para la seguridad de la aeronavegación es ínfimo y por los fines a los que están destinados. Y ello sin perjuicio de que deban cumplir con las restricciones de la Directiva 2009/48/CE de 18 de junio de 2009 sobre la seguridad de los juguetes.

Un ejemplo sería el dron de juguete Syma X5C, equipado con cámara capaz de tomar fotografías y vídeos y peso superior a los 900 g cuyo registro por parte de su operador no es obligatorio. Si no se tratara de un juguete, su MTOM implicaría un marcado de clase C1 o superior ($>250 \text{ g}$) y además se exigiría su constancia registral por incluir sensores de captación del sonido e imagen que permiten la toma de datos personales.

Especificaciones técnicas [33]

- Frecuencia: 2.4G
- Píxeles de la cámara: 200 W
- Fotos: Cerca de 800 fotos
- Tiempo de vuelo: 5-8 minutos
- Distancia: Cerca de 50 metros
- Peso: 916g
- Dimensiones: 31,5 x 31,5 x 7,5 cm
- Tiempo grabación Video: 30 minutos



Figura 5.18: Especificaciones técnicas dron juguete Syma X5.

Dichos escenarios se sintetizan en la Tabla 3:

OBLIGACIÓN DE REGISTRO	NO OBLIGACIÓN DE REGISTRO
<ul style="list-style-type: none"> - UAS categoría específica. - UAS categoría abierta: <ul style="list-style-type: none"> ✓ MTOM \geq 250 g. ✓ MTOM < 250 g + colisión > 80 J.⁹¹ ✓ MTOM < 250 g + sensor datos personales. 	<ul style="list-style-type: none"> - UAS categoría abierta: <ul style="list-style-type: none"> ✓ MTOM < 250 g + colisión < 80 J. ✓ MTOM < 250 g sin sensor datos personales ✓ Juguetes.

Tabla 3: Diferencias entre la obligación/no obligación de registro.

En definitiva, se han estimado dignos de protección jurídica el derecho a la intimidad y la protección de datos de naturaleza personal, así como la seguridad de los particulares. Ante operaciones que entrañen un riesgo inherente (categoría específica y categoría abierta subcategorías A2 o A3) o que puedan conllevar peligros de infracción de la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales [34], o para la seguridad de los particulares (riesgos para la vida o la salud por colisión), el legislador ha establecido mecanismos de control para el aseguramiento de las responsabilidades que del uso de UAS se pudieran derivar (responsabilidad civil extracontractual).

El registro se realizará en el Estado Miembro de residencia o donde se halle el centro de actividad principal de los operadores, en función de si se trata de personas físicas o

jurídicas respectivamente.⁴²

3.1.2.1. Agencias reguladoras en Europa. EASA.

En el ámbito europeo destaca la Agencia Europea de la Seguridad Aérea (European Union Aviation Safety Agency), con sede en Colonia (Alemania) que fue creada en virtud de Reglamento (CE) n^o 1592/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de julio de 2002, sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por el que se crea una Agencia Europea de Seguridad Aérea. [35]

Se trata de un organismo independiente garante de la seguridad aérea en Europa, fomentando la protección del medio ambiente. [36]

Se constituye en autoridad competente en materia de certificación y supervisión de aeronaves a los efectos de asegurar el cumplimiento de los requisitos exigidos en materia de seguridad. También promueve la capacitación y la formación de los profesionales de la aviación.

Propone normas, emite dictámenes y orientaciones que pueden llegar a plasmarse en Reglamentos y Directrices de la Comisión, referentes a la aviación civil y, en particular a las operaciones con sistemas de aeronaves no tripulados.

Tiene encomendada la coordinación y fomenta la cooperación internacional con otras Agencias, con la OACI y con las Agencias que creen o existan en los Estados Miembros. Realiza, por tanto, una importante labor de armonización de la normativa sobre aeronavegación bajo la superior supervisión de la Organización de Aviación Civil Internacional.

5.1.3. Marco regulatorio español

La legislación española en la materia se funde con la europea por el efecto directo y general que los Reglamentos tienen en el ordenamiento jurídico de los Estados Miembros de la Unión Europea. Por tanto, como se ha comentado más arriba los Reglamentos estudiados se aplican como una norma interna más.

Además de su reglamentación en el ámbito de la Unión Europea, el legislador español aprobó el 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.

Para determinar su ámbito de aplicación conviene recordar el concepto de aeronaves

⁴²Art. 14.6 Reglamento (UE) 2019/947.

civiles pilotadas a distancia o por control remoto o RPA (“Remotely Piloted Aircraft”). Pues bien, siguiendo el criterio de la OACI anteriormente expuesto se refiere a aquellos UAS que se entienden aptos para adaptarse o integrarse a la aeronavegación civil “junto al resto de tráficos tripulados en espacios aéreos no segregados y en aeródromos”⁴³, en contraposición a los UAS clasificados como “aeronaves plenamente autónomas”, excluidos de la aplicación del Real Decreto.

El artículo 2 concreta este punto al señalar los UAS definidos como RPA a los que se afecta el Real Decreto 1036/2017:

1. MTOM < 150 kg.
2. MTOM indiferente, excluidos de Reglamento (CE) 216/2008⁴⁴ que realicen operaciones aéreas especializadas o vuelos experimentales.
3. MTOM indiferente, que realicen actividades de policía, aduanas búsqueda, salvamento, actividades de lucha contra incendios, guardacostas, . . . ⁴⁵

Se excluyen de la aplicación del Real Decreto⁴⁶:

1. Globos no tripulados y cautivos.
2. Vuelos en espacios interiores cerrados.
3. RPA militares.
4. RPA utilizados para exhibiciones aéreas, deportivas, recreativas, lúdicas, de competición, juguetes.
5. RPA con MTOM > 150 kg salvo los excluidos de Reglamento (CE) 216/2008⁴⁷ que realicen operaciones aéreas especializadas o vuelos experimentales o que realicen actividades de policía, aduanas, búsqueda, salvamento, actividades de lucha contra incendios, guardacostas, . . .

⁴³Exposición de Motivos RD 1036/2017.

⁴⁴Reglamento (CE) No 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de febrero de 2008 sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por el que se crea una Agencia Europea de Seguridad Aérea, y se deroga la Directiva 91/670/CEE del Consejo, el Reglamento (CE) no 1592/2002 y la Directiva 2004/36/CE.

⁴⁵Art. 3 RD 1036/2017.

⁴⁶Art. 3 RD 1036/2017.

⁴⁷Reglamento (CE) No 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de febrero de 2008 sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por el que se crea una Agencia Europea de Seguridad Aérea, y se deroga la Directiva 91/670/CEE del Consejo, el Reglamento (CE) no 1592/2002 y la Directiva 2004/36/CE.

El Capítulo II del Real Decreto se refiere, en desarrollo de los criterios de la OACI y de los Reglamentos europeos, a los requerimientos en materia de identificación y matriculación. Así, los RPA se identificarán por medio de una placa de identificación ignífuga que relacione el fabricante, tipo, modelo, número de serie, operador y datos de contacto del anterior.⁴⁸

Se reserva el requisito de la matriculación y la obligatoriedad de obtener certificado de aeronavegabilidad a los RPA de MTOM > 25 kg⁴⁹, salvo si son de naturaleza experimental, en cuyo caso se exime de la obligación de obtención de dicho certificado⁵⁰. No obstante, que no sea de carácter preceptivo no implica que voluntariamente no se pueda solicitar.

Por lo que respecta a la utilización del espacio aéreo español por los RPA se distinguen dos supuestos en función de si se opera con certificado de aeronavegabilidad o no.

1. Condiciones para RPA sin certificado de aeronavegabilidad:

- a) *“Zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre.”*
- b) *Zonas en espacio aéreo no controlado y fuera de una zona de información de vuelo (FIZ), siempre que la operación se realice [...]”*⁵¹
 - Dentro del alcance visual del piloto/observadores en contacto por radio con él.
 - Hasta 500 m distancia horizontal máxima.
 - Altura máxima \leq 120 m o sobre el obstáculo más alto dentro de un radio de 150 m.
- c) Zonas de los casos a) y b) más allá del alcance visual del piloto pero dentro del alcance de la emisión por radio de la estación de pilotaje remoto si:
 - MTOM \leq 2 kg.
 - RPA cuente con sistemas de detección y evitación de otros usuarios en el espacio aéreo aprobados por la AESA.⁵²
- d) Zonas de *“aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado y fuera de una zona de información de vuelo (FIZ)”*⁵³ si:
 - MTOM \leq 10 kg.

⁴⁸Art. 8 RD 1036/2017.

⁴⁹Art. 9 RD 1036/2017.

⁵⁰Art. 12 RD 1036/2017.

⁵¹Art. 21.1 RD 1036/2017.

⁵²Art. 21.2 RD 1036/2017.

⁵³Art. 21.3 RD 1036/2017.

- Dentro del alcance visual del piloto.
- Hasta 100 m distancia horizontal máxima.
- Altura máxima \leq 120 m o sobre el obstáculo más alto dentro de un radio de 600 m.
- Zonas acotadas con limitación del paso de personas y vehículos/50 m distancia horizontal mínima.

2. Condiciones para RPA con certificado de aeronavegabilidad:

- a) Limitaciones del certificado emitido por AESA.
- b) Si no disponen de sistemas de detección y evitación de otros usuarios en el espacio aéreo se limita su utilización al espacio aéreo temporalmente segregado para el desarrollo de sus operaciones.⁵⁴

La utilización del espacio aéreo para la realización de vuelos por RPA de carácter experimental⁵⁵ se encuentra todavía más limitado, restringiéndose, conforme prescribe el art. 23 del Real Decreto a zonas segregadas determinadas para el vuelo experimental a realizar, alejadas en todo momento de zonas habitadas o de concentraciones de personas; o en el espacio aéreo no controlado fuera de zonas de información de vuelo. Se obliga a establecer zonas de seguridad con el fin de evitar riesgos para otros operadores.⁵⁶

Una limitación adicional se impone a los RPA en coherencia con las condiciones impuestas de visibilidad y mantenimiento del sistema de aeronave no tripulado dentro del alcance visual del piloto a distancia. Esta limitación delimita la actividad de los RPA a horas diurnas y a condiciones meteorológicas que permitan el vuelo visual⁵⁷. Evidentemente, se prevén excepciones a la norma pero todas ellas incluyen la necesidad de recabar autorización expresa de la AESA que podrá imponer condiciones de vuelo para su concesión.

Una vez se han tratado los requisitos exigidos a los RPA, es preciso analizar ciertas condiciones que se relacionan en el Real Decreto 1036/2017 y que afectan no a la aeronave no tripulada sino a su operador. Entre ellas destacan el conocimiento de toda la documentación que afecte al RPA a utilizar, el estudio previo de seguridad de las operaciones que se pretenden llevar a cabo, la protección frente a interferencias o accesos ilegítimos al

⁵⁴Art. 22 RD 1036/2017.

⁵⁵Art. 5 s) RD 1036/2017. E.g.: “Vuelos de I+D, realizados por fabricantes u otras entidades, organizaciones, organismos, instituciones o centros tecnológicos para el desarrollo de nuevas aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) o de los elementos que configuran el RPAS.”

⁵⁶Art. 23 RD 1036/2017.

⁵⁷Art. 25 RD 1036/2017.

control de la aeronave, deber de notificación en caso de accidente o incidentes de gravedad, ...⁵⁸

Es digna de mención la referencia que el art. 26 del Real Decreto hace respecto a la contratación de un seguro de responsabilidad civil por parte de los operadores que cubra los daños que se produzcan con ocasión de la utilización de este tipo de aeronaves dirigidas por control remoto. En principio, sólo se establece como obligatorio si se trata de operaciones aéreas especializadas⁵⁹ ⁶⁰ o vuelos experimentales, que entrañan un mayor riesgo por su naturaleza técnica o por sus fines empíricos. Sin embargo, puede ser recomendable para los operadores en general contar con un seguro si su actividad con RPA es recurrente ya que el vuelo por control remoto entraña riesgos para terceros y puede devenir en indemnizaciones cuantiosas para los usuarios que no dispongan de garantías de responsabilidad.

De forma paralela a los requisitos exigidos a los RPA, los arts. 27 y 28 del RD 1036/2017 también desarrollan obligaciones específicas para los operadores de operaciones aéreas especializadas y experimentales en todo lo relativo a la formación y cualificación de los participantes, organización de la operación, estudios previos de seguridad, ... todo ello con el ánimo de garantizar el buen resultado del vuelo.⁶¹

La Disposición Final Primera del RD 1036/2017 introduce un Capítulo VIII⁶² al 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 se modifica el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. En su art. 23 ter reproduce algunas de las limitaciones operativas que incluía el RD 1036/2017 y se incluye alguna otra:

- Vuelo diurno y/o en condiciones meteorológicas de visibilidad.
- Altura máxima \leq 120 m o sobre el obstáculo más alto dentro de un radio de 150 m.
- Dentro del alcance visual del piloto/ dentro del alcance directo de emisión por radio de la estación de pilotaje remoto.

⁵⁸Art. 26 RD 1036/2017.

⁵⁹“Operaciones aéreas especializadas, también denominadas trabajos técnicos, científicos o trabajos aéreos: Cualquier operación, ya sea comercial o no comercial, distinta de una operación de transporte aéreo, en la que se utiliza una aeronave pilotada por control remoto (RPA) para realizar actividades especializadas, tales como, actividades de investigación y desarrollo, actividades agroforestales, levantamientos aéreos, fotografía, vigilancia, observación y patrulla, incluyendo la filmación, publicidad aérea, emisiones de radio y televisión, lucha contra incendios, lucha contra la contaminación, prevención y control de emergencias, búsqueda y salvamento o entrenamiento y formación práctica de pilotos remotos.” Art. 5 l) RD 1036/2017.

⁶⁰Art. 26 c) RD 1036/2017.

⁶¹Arts. 27 y 18 RD 1036/2017.

⁶²Rubricado como “Sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS)”.

- Si no disponen de sistemas de detección y evitación de otros usuarios en el espacio aéreo se limita su utilización al espacio aéreo temporalmente segregado para el desarrollo de sus operaciones.

- Estudio de pilotaje para operaciones sobre aglomeraciones por RPA sin certificado de aeronavegabilidad.

- Vuelo fuera de la zona de tránsito de aeródromo (salvo excepciones).
 - ≥ 8 km (distancia mínima) respecto de aeropuertos o aeródromos.

 - ≥ 6 km desde el umbral en sentido de alejamiento de la pista.

 - ≥ 15 km si la infraestructura cuenta con procedimientos de vuelo instrumental y el RPA está fuera del alcance visual del piloto.

Agencias reguladoras en España. DGAC, AESA y ENAIRE.

DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL:

La Dirección General de Aviación Civil es un órgano del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana⁶³ con funciones de diseño estratégico de la política aeronáutica en España. Se encarga de elaborar estudios, propuestas y circulares, negociar acuerdos internacionales que afectan al sector y, principalmente tiene funciones de coordinación y regulación de los diferentes organismos y entes públicos adscritos al Ministerio, como AESA o ENAIRE. Podríamos definirlo como el órgano de la Administración General del Estado que dibuja las líneas maestras de la aviación civil en el territorio nacional, bajo cuyo paraguas actúan conjuntamente y siguiendo criterios comunes las distintas entidades creadas para asegurar un buen funcionamiento de la aviación civil española.

⁶³Art. 7 Real Decreto 645/2020, de 7 de julio, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. [37]

Seguridad Aérea^{65 66}. Así, por ejemplo, será preciso acudir a esta Agencia Estatal para:

- Acogerse a escenarios estándar de la categoría específica, previstos por la Agencia (reflejo de los escenarios creados por el Reglamento (UE) 2019/947⁶⁷), presentando ante la AESA declaraciones operacionales. Se han diseñado dos escenarios: STS-ES-01⁶⁸ y STS-ES-02⁶⁹,
- Recabar autorización para:
 - Operar en la categoría específica.
 - Operar vuelos RPA nocturnos.⁷⁰
 - Transportar a bordo de una RPA objetos o sustancias peligrosas.⁷¹
 - Realizar operaciones aéreas especializadas y vuelos experimentales MTOM >25 kg.
 - Realizar operaciones aéreas especializadas en espacio aéreo controlado o dentro de zona de información de vuelo (se incluye zona de tránsito del aeródromo).⁷²
- Solicitar certificados de aeronavegabilidad (de tipo restringido) conforme al Reglamento (UE) n^o 748/2012⁷³. La AESA asume las funciones de la EASA en la emisión de dichos certificados⁷⁴ dentro del ámbito territorial español.

⁶⁵Art. 9 Estatuto de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea.

⁶⁶Art. 6.1 RD 1036/2017: *“Corresponde a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea resolver sobre las autorizaciones, certificados y habilitaciones previstas en este real decreto”*.

⁶⁷Resolución de la dirección de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea por la que se aprueban escenarios estándar nacionales (STS-ES) para operaciones de UAS en la categoría «específica» al amparo de una declaración operacional de conformidad con el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 de mayo de 2019, relativo a las normas y procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas. [39]

⁶⁸STS-ES-01: Operaciones VLOS sobre una zona terrestre controlada en un entorno poblado. [40]

⁶⁹STS-ES-02: Operaciones BVLOS con observadores del espacio aéreo sobre una zona terrestre controlada en un entorno poco poblado.[40]

⁷⁰Art. 25 RD 1036/2017.

⁷¹Art. 31 RD 1036/2017.

⁷²Arts. 24 y 40 RD 1036/2017.

⁷³Reglamento (UE) n^o 748/2012, de 3 de agosto de 2012 por el que se establecen las disposiciones de aplicación sobre la certificación de aeronavegabilidad y medioambiental de las aeronaves y los productos, componentes y equipos relacionados con ellas, así como sobre la certificación de las organizaciones de diseño y de producción.

⁷⁴Art. 9.1 párrafo 3^o RD 1036/2017 *“Las referencias del citado Reglamento a la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), en el ámbito de las competencias de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, deberán entenderse referidas a ésta.”*

- Reconocer certificados de tipo o de aeronavegabilidad de autoridades competentes de otros Estados Miembros.⁷⁵
- Obtener habilitación para realizar vuelos experimentales autorizados en otro Estado Miembro.⁷⁶
- Instar la emisión del certificado especial (potestativo) para vuelos experimentales.⁷⁷
- Registrarse como operador de UAS en los supuestos del Art. 14 Reglamento (UE) 2019/947⁷⁸. El registro no implica costes y debe realizarse por sede electrónica. [41]
- Comunicar con carácter previo al desarrollo de una operación a realizar en los casos siguientes:
 - Zona fuera de aglomeraciones.
 - Fuera del espacio aéreo controlado/fuera de zona de información de vuelo.
 - Dentro del alcance visual del piloto u observadores/ fuera de su alcance visual pero dentro del alcance directo de emisión por radio de la estación de pilotaje.
 - Vuelos experimentales de RPA con MTOM ≤ 25 kg.⁷⁹/vuelos de operaciones RPA especializadas con MTOM ≤ 50 kg.

Tiene, por tanto, competencias similares a la EASA, pero en el ámbito interno español. Las Agencias nacionales actúan como “delegadas” de la Agencia europea en los respectivos Estados Miembros, asumiendo la ejecutividad de la normativa europea en materia de UAS en sus respectivos territorios. De ahí la importancia de la cooperación y coordinación entre las distintas Agencias a la hora de aplicar la legislación vigente con el objetivo de crear un marco común en toda la Unión Europea que fomente la industria de la aeronáutica y la seguridad tanto jurídica como operacional.

ENAIRE:

La entidad pública empresarial ENAIRE sustituye en denominación a la entidad pública AENA (Aeropuertos Españoles y Navegación)⁸⁰, con el mismo régimen y naturaleza

⁷⁵Art. 11RD 1036/2017.

⁷⁶Art. 41 RD 1036/2017.

⁷⁷Art. 12 RD 1036/2017.

⁷⁸UAS de categoría específica con independencia de su masa y UAS de categoría abierta siguientes: 1) MTOM ≥ 250 g / transferencia de energía cinética en supuesto de colisión > 80 J. 2) Estar equipado con sensor capaz de captar datos personales, salvo que se trate de juguetes.

⁷⁹Art. 39 RD 1036/2017.

⁸⁰Art. 18 Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia. [42]

de su predecesora⁸¹. Se trata de una entidad adscrita al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana⁸² que se encarga de la gestión de la navegación aérea española. En concreto tiene asignadas las siguientes funciones:

“a) La prestación de forma segura, eficaz, continuada y sostenible de los servicios de navegación aérea y espacio aéreo encomendados por el Estado.

*b) La coordinación operativa nacional e internacional de la red nacional de gestión del tráfico aéreo y otras relacionadas con los usos para la gestión eficiente del espacio aéreo teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios del espacio aéreo.”*⁸³

Se encarga de proveer *“de servicios de comunicaciones, navegación y vigilancia en todo el espacio aéreo español y en los aeropuertos de la red Aena”*. [44]

ENAI-RE, además de aglutinar y simplificar la abundante normativa vigente en materia de UAS y de dar respuestas a los operadores de sistemas de aeronaves no tripulados en su planificación de vuelo, se encuentra asimismo realizando ensayos para una eventual y futura integración de los SANT en el espacio aéreo controlado[45] (es preciso recordar que actualmente se encuentran excluidos, salvo determinadas operaciones aéreas especializadas previa autorización de la AESA)⁸⁴. Esto supone sentar las bases de un nuevo panorama en la aviación internacional al liberalizar el espacio aéreo a los sistemas de aeronaves no tripulados con el objetivo de lograr la convivencia de éstos con las aeronaves tripuladas.

Asimismo, ha elaborado una aplicación, ya introducida anteriormente, llamada ENAI-RE Drones (versión actual 1.10.2) con los datos obtenidos de la publicación AIP España⁸⁵ (Publicación de Información Aeronáutica o Aeronautical Information Publication en sus siglas en inglés), que se actualiza regularmente (cada 28 días)⁸⁶ para proporcionar información fiable, segura y eficiente a los operadores sobre el espacio aéreo. La aplicación consiste en un mapa que distingue en función del tipo de vuelo, sea éste recreativo, experimental u operaciones especializadas; en función de la distancia, si se vuela en VLOS (dentro del alcance visual del piloto) o BVLOS (fuera del alcance visual del piloto); y si el vuelo implica o no la obtención de vídeos o fotografías.

⁸¹Art. 82 Ley 4/1990, de 29 de junio, de Presupuestos Generales del Estado para 1990, por el que se crea el ente de Derecho Público AENA.

⁸²Art. 1 Estatuto de la Entidad pública empresarial ENAI-RE aprobado por el Real Decreto 160/2023, de 7 de marzo. [43]

⁸³Art. 5.1 Estatuto de la Entidad pública empresarial ENAI-RE.

⁸⁴Arts. 24 y 40 RD 1036/2017.

⁸⁵Manual de información sobre la navegación aérea de un país. [6]

⁸⁶Tal y como marca la OACI a través del sistema de Regulación y Control de Información Aeronáutica o AIRAC (“Aeronautical Information Regulation and Control”).

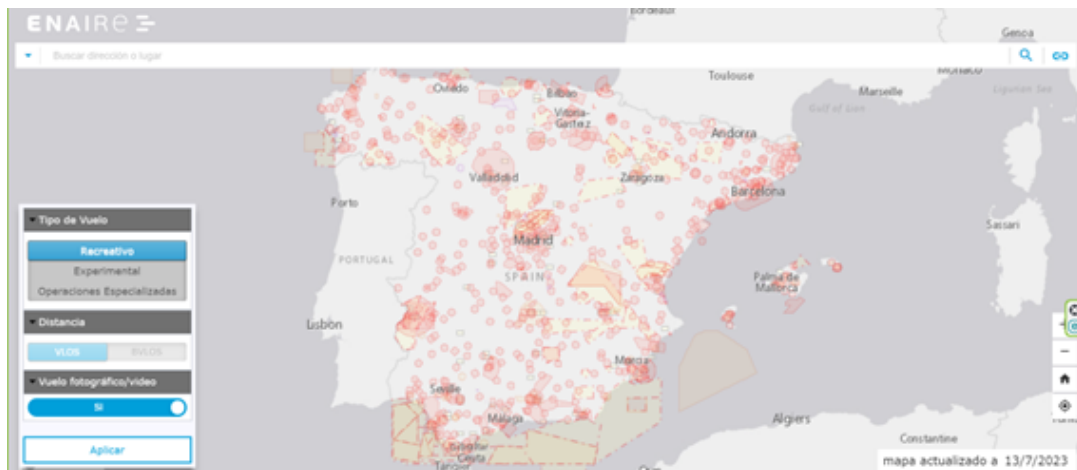


Figura 5.20: ENAIRE Drones. [46]

En definitiva, la labor de las organizaciones internacionales y de las Agencias europea y de los Estados miembros va desde la generalidad de las recomendaciones hasta la plasmación de éstas en normas vinculantes. Pero para la puesta en práctica de todo el cuerpo legal diseñado se crean entes públicos como ENAIRE que se encargan de gestionar y organizar las operaciones de tráfico aéreo, sirviendo como canal de comunicación e información con los operadores, facilitando herramientas útiles y directrices claras y precisas para una utilización eficiente del espacio aéreo español.

5.2. Geoconsciencia

Con el objetivo de no vulnerar las leyes que regulan la presencia de los drones en ciertas zonas restringidas del espacio aéreo, es preciso dotar a estas aeronaves de geoconsciencia. Es más, para que los drones puedan obtener los certificados que atienden a los diversos marcados de clase que quedan definidos por los Reglamentos de la Unión Europea, salvo el tipo 0, es requisito necesario que estén dotados de esta tecnología.

En esencia, la geoconsciencia se define como la capacidad que tienen algunos UAVs de conocer su posición de manera precisa y a tiempo real, algo que acaba redundando positivamente en la seguridad durante sus operaciones. Esto se debe a que a partir de los datos que recogen a tiempo real, es posible tomar decisiones bien sea por parte del piloto o bien de manera automática por el UAV para evitar colisiones o modificando sus rutas.

Que una aeronave no tripulada pueda ser considerada como geoconsciente implica los siguientes aspectos que se describirán en los puntos que a continuación se desarrollan:

- Capacidad de detección de obstáculos.
- Posicionamiento.
- Conocimiento del espacio aéreo y del entorno.
- Comunicación.

5.2.1. Capacidad de detección de obstáculos

Para ello, son de gran utilidad los diferentes sensores que la aeronave pueda llevar incorporada. Además de las cámaras, algo que se suele observar más comúnmente en ese tipo de dispositivos, también pueden instalarse en ellos otro tipo de sensores como de ultrasonidos o sensores de "Detección y Medición por Láser" LIDAR para inspeccionar el terreno que sobrevuelan.

Por otro lado, la presencia de radares mejora las capacidades operacionales de la aeronave, pues aumenta su capacidad de detección de objetos en condiciones adversas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esto acaba implicando, en la mayoría de los casos, una disminución de las capacidades operativas, principalmente por el notable incremento de la MMD. [47]

Todos estos sistemas una vez instalados en un dron pueden resultar de utilidad para evitar colisiones de manera autónoma, sin necesidad de que el piloto interfiera en la operación.

5.2.2. Posicionamiento

Estos tipos de UAS presentan sistemas de posicionamiento, como pueden ser el GPS estadounidense, el sistema de navegación por satélite ruso GLONASS u otros sistemas globales de navegación por satélite como pueden ser el sistema europeo Galileo o el sistema chino Beidou. De esta manera, dependiendo de la zona en la que se encuentren y de la tecnología que incorporen, se hará uso de unos u otros sistemas de navegación por satélite con el objetivo de determinar su posición exacta con mínimos márgenes de error.

Es necesario tener en cuenta que no todas las UAVs cuentan de manera obligada con instrumentación a bordo para determinar la posición a tiempo real, sino que esto dependerá del tipo de operación y del espacio aéreo en el que ésta se esté desarrollando.

En concreto, si se trata de operaciones a muy bajas alturas (VLL “Very Low Level”) en las cuales el piloto mantiene perpetuamente contacto visual con la RPA, entonces no resultaría necesario contar con este tipo de medidas. Por ejemplo, en vuelos de tipo VLOS (“Visual Line of Sight”), en los que las operaciones se realizan en condiciones meteorológicas que puedan garantizar el contacto visual (VMC) y con el piloto a una distancia inferior a 500 metros. Por el contrario, si las RPAs realizan sus operaciones a distancias mayores a 500 metros del piloto, se considera que no se puede garantizar el contacto visual, debiendo la RPA volar la mayor parte del tiempo en instrumental y atender a los requerimientos determinados del espacio aéreo que esté sobrevolando, mediante certificaciones operacionales de la aeronave que se correspondan con dicho espacio aéreo. [9]

Tipo de operación	Radio operacional	Contacto visual
VLOS Visual Line of Sight	< 500 m	Por parte del piloto
E-VLOS Extended VLOS	> 500 m	Por parte del piloto y otros observadores
B-VLOS Beyond VLOS	> 500 m	Sin contacto visual

Tabla 4: Tipos de operaciones VLL (Very Low Level). [48]

Por otro lado, los UAVs también hacen uso de otro tipo de sistemas que nada tienen que ver con la navegación por satélite para tener datos relacionados con su posición. Por ejemplo, dado que en los sistemas de navegación por satélite resulta complicado determinar la altura a la que estas aeronaves están volando, pueden hacer uso de altímetros.

También resulta útil el uso de sistemas de medición inercial que proporcionen datos de posición, orientación y velocidad de estas aeronaves sin tener una dependencia directa de datos externos como ocurre con los sistemas de navegación basados en satélites. Sin embargo, en algunos casos que requieran una mayor precisión resulta conveniente combinar la información que proporcionan estos sistemas inerciales, como puede ser el caso de las

Unidades de Medición Inercial (IMU) junto con otro tipo de datos, como los obtenidos por los sistemas de navegación por satélite, de manera que se puedan corregir los errores que suelen acumular las IMU con el paso del tiempo.

- **Receptores GPS en drones.** Los drones se sirven tanto de los sistemas inerciales como del posicionamiento GNSS para determinar su posición. Más concretamente, pueden hacer uso del sistema GPS mediante los receptores GPS.

Estos receptores también existen en la aviación tripulada convencional y permiten recabar información relativa a la posición (latitud y longitud), velocidad y tiempo. Este tipo de sistemas se sirven de las señales provenientes de las constelaciones GPS y GLONASS.

Los sistemas de navegación GPS deben cumplir los requisitos de la navegación basada en prestaciones (precisión, integridad, continuidad, y disponibilidad), pero los dos últimos requisitos no siempre se pueden garantizar. Es por ello que, en aviación tripulada, se deben combinar con otro tipo de sistemas como las radioayudas convencionales.

Las etapas más destacadas de los receptores GPS son las siguientes: [49]

- **Etapas de recepción.** Las señales emitidas por los satélites alcanzan la antena del receptor situado en la aeronave. Dichas señales albergan información sobre la posición orbital del satélite que ha emitido cada una de ellas, así como del tiempo en el que se emitió esa señal. Se pasa entonces por un proceso de filtrado y amplificación.
- **Procesado de la señal.** Este proceso consiste en la sincronización del satélite y el receptor.
- **Procesado de los datos.** En esta etapa se utiliza la información recabada en las etapas anteriores para calcular las distancias entre el receptor y cada satélite, determinando así velocidades y posiciones, incluyendo altitudes. Esto se consigue con métodos sofisticados de triangulación de la posición del receptor recibiendo al menos la señal de cuatro satélites, mediante el proceso conocido como trilateración [50] o multilateración. Su funcionamiento consiste en analizar las señales de estos satélites, pues las coordenadas de éstos son conocidas. Teniendo en cuenta que con uno de estos satélites es posible situar un punto en una superficie circular, al añadir la información proveniente de un segundo satélite se lograría estrechar la superficie donde el UAS se encontraría ubicado, pues el punto se encontraría dentro de la zona donde las dos superficies

se superpondrían. La información del tercer satélite permite finalmente localizar el punto concreto y, finalmente, la señal recibida por un cuarto satélite se utiliza para conocer la información de elevación o altitud de la aeronave. Si se emplea en este método de determinación de la posición las señales de cuatro o más satélites, el proceso se conocería como multilateración, y la precisión va en aumento en la medida en la que lo hace el número de satélites implicados.

Además, es en este momento cuando se aplican las correcciones necesarias a los cálculos para tener en cuenta, por ejemplo, efectos atmosféricos, como los debidos a los fenómenos que ocurren en la troposfera o en la ionosfera.

Es preciso puntualizar que no siempre es posible recibir señales de todos los satélites, lo que puede deberse a la existencia de elementos que obstruyan la llegada de las señales de los satélites al receptor incorporado en la aeronave.



Figura 5.21: Triangulación de un punto mediante el método de la trilateración. [51]

- **Presentación de resultados.** En la unidad de presentación aparecen los resultados de los cálculos anteriores. Se muestra información como la posición a tiempo real, generalmente en el sistema WGS-84 en coordenadas curvilíneas, sistema de referencia utilizado comúnmente para la navegación satelital. Además de la latitud y longitud, se muestra la altitud sobre el elipsoide de referencia. También se muestran en esta unidad los demás puntos de la ruta si se trata de navegación basada en “waypoints”, además de la distancia y el tiempo que resta hasta el siguiente punto de la ruta seleccionada.

Las principales ventajas que tiene el uso de sistemas de posicionamiento en UAS como el GPS son la posibilidad de emplear esta tecnología en vuelos autónomos mediante rutas programadas gracias a la navegación basada en waypoints o las funciones de regreso a casa para que el dron realice automáticamente vuelos de vuelta hasta el lugar de origen

con la trayectoria que ha seguido inicialmente. También es capaz de mantenerse en el aire en una localización determinada con independencia de las condiciones atmosféricas que puedan desviarlo de ese punto. [52]

5.2.3. Navegación

Una vez el UAS es capaz de determinar de manera precisa su posición mediante métodos de posicionamiento (GPS, sistemas inerciales, etc.), es necesario que estas aeronaves puedan dirigirse a diferentes zonas según los requerimientos de su operación. Para ello, existen varios métodos: [53]

- **Control por parte del piloto en remoto.** El piloto envía instrucciones en remoto a la aeronave que afectan a los controles de ésta para que pueda modificar sus actitudes en vuelo y navegue así por el espacio aéreo en el que se encuentra de forma controlada íntegramente por su piloto.
- **Instrucciones predeterminadas.** En este caso, las decisiones para modificar las condiciones del UAS no se toman a tiempo real, sino que existe un plan de vuelo predefinido con las instrucciones que deberá seguir la aeronave en cada fase de la operación (variación de su altitud, velocidad, dirección, ...).
- **Navegación mediante waypoints.** Se basa en la provisión de una secuencia de coordenadas a las que el UAS deberá dirigirse durante el vuelo, tomando las acciones de control necesarias para conseguirlo. Mediante este método, es posible efectuar vuelos autónomos únicamente proveyendo a la aeronave del plan de vuelo, si bien el piloto puede tomar en momentos concretos del vuelo el mando de la aeronave si así lo requiere la operación.

Precisamente este tipo de tecnología de navegación mediante waypoints es cada vez más común por permitir la realización de vuelos autónomos, sin necesidad de comunicación continua con un piloto en remoto. Se basa en los siguientes componentes: [54]

- **Receptor GPS.** A bordo del UAS, recibe la señal GPS para poder determinar la posición en la que se encuentra.
- **Controlador.** Gracias a este elemento es posible estimar la ruta que se va a efectuar basándose tanto en los waypoints a los que tiene que dirigirse el dron como en la información dada por el receptor GPS sobre su posición.
- **Autopiloto.** Actúa en los controles del UAS, lo que afecta al movimiento y a la propia trayectoria que utiliza el sistema para trasladarse desde un waypoint hasta el siguiente.

- **Software de planificación de misión.** Fundamental para elaborar el “flight plan” o plan de vuelo de la misión. El propio sistema de navegación puede definir los waypoints de la ruta para cumplir dicho plan.
- **Estación en tierra.** Desde ella, el piloto puede monitorizar de manera remota las actuaciones de la aeronave, pudiendo tomar puntualmente el control de la aeronave si así fuera necesario.

Además, este tipo de navegación también suele incorporar sistemas de detección y evasión de obstáculos para que el vuelo pueda realizarse de manera plenamente autónoma. Para ello, el UAS se equipa de diversos tipos de sensores que le permiten tomar consciencia de lo que ocurre a su alrededor, para que pueda actuar en consecuencia y evitar posibles colisiones.

Actualmente, la navegación basada en waypoints en UAS constituye una alternativa a la navegación llevada a cabo por parte del piloto a distancia que cada vez goza de mayor presencia en el mundo de la navegación aérea, principalmente, por las siguientes razones:

- **Mejora en la seguridad de las operaciones.** Establecer con anterioridad un plan de vuelo con las localizaciones por donde debe pasar el UAS garantiza la no intromisión de estas aeronaves en regiones del espacio aéreo restringidas. Además, limita la actuación del piloto a momentos concretos de la operación, lo que reduce el factor humano y los posibles riesgos de accidente que se pudieran derivar.
- **Mejora en la precisión.** Al exigir al UAS realizar vuelos que pasen por puntos concretos, se está aumentando la precisión de las operaciones. Esto es especialmente importante, pues aeronaves que vuelen en determinadas zonas del espacio aéreo deberán cumplir los requisitos de comunicaciones, navegación y vigilancia de dichas zonas, con las implicaciones que se derivan en términos de precisión⁸⁷, pues en determinadas zonas del espacio aéreo se puede exigir a los operadores de estos dispositivos que cumplan con requisitos operacionales concretos que pueden ser previstos con antelación en el diseño de la operación.

Aunque esto constituye una ventaja, la continua mejora de la precisión en este tipo de sistemas de navegación debe seguir desarrollándose. Con una mayor precisión a la hora de determinar parámetros durante el vuelo como la posición y altitud, la velocidad, las condiciones del viento o la presencia de posibles obstáculos, se podrá llegar a calcular trayectorias de navegación de manera más fiable y exacta.

⁸⁷Circular OACI 328-AN/190, página 30, “Radioayudas para la navegación y equipo de navegación de a bordo”. Apartados 6.28 y 6.29. [9]

5.2.4. Conocimiento del espacio aéreo

Para que un UAS sea catalogado dentro de los sistemas con geoconsciencia no solamente ha de ser capaz de determinar su posición de forma precisa, sino que es necesario también que conozca cuál es la relación entre esta posición y las diversas zonas del espacio aéreo que quedan restringidas, como zonas militares, zonas cercanas a aeropuertos, etc.

Con este objetivo, los UAS deben poder interactuar con los sistemas de gestión de tráfico aéreo (ATM) para garantizar la seguridad de sus operaciones. Esta interacción se lleva a cabo gracias a sistemas de comunicación, que suelen incluir elementos como Sistemas de Identificación Automática (AIS) y transpondedores, estaciones en tierra y redes de comunicación, software de gestión del tráfico aéreo y planificación de rutas y protocolos de comunicación estándar.

■ **Transpondedores y Sistemas de Identificación Automática (AIS):**

- Es posible para los sistemas de gestión del tráfico aéreo tener identificados a los UAS en vuelo en cada momento, conociendo además su posición a tiempo real. Esto se puede conseguir gracias a las señales que se emiten por parte de estas aeronaves mediante los Sistemas de Identificación Automáticos que llevan incorporados.
- Para el caso de los UAVs, pueden estar equipados con transpondedores que emiten señales con información codificada que informan sobre su identificación y posición.
 - **Radar primario (PSR, “Primary Surveillance Radar”).** En primer lugar, mediante el uso del radar primario, se puede localizar a la aeronave basándose en el uso de señales de radio reflejadas. Con ello, es posible determinar la distancia a la que estas aeronaves se encuentran de los radares, determinando su posición en el plano horizontal, no siendo posible conocer mediante este método la altitud a la que vuelan.
 - **Radar secundario (SSR, “Secondary Surveillance Radar”).** Por su parte, este tipo de radares emite una señal a una frecuencia de 1030 MHz que interroga a las aeronaves y, como respuesta, éstas emiten otra señal a 1090 MHz que, de nuevo, llega al radar secundario con información que puede ser de utilidad a los sistemas de control de tráfico aéreo. En los aviones, esta información varía en función de si el transpondedor está emitiendo en modo A, donde únicamente se facilita información sobre el código squawk o número que se le asigna a la aeronave para su correcta identificación; modo C, donde también se proporciona información de altitud; y,

finalmente, el modo S, donde se proporciona otro tipo de datos adicionales como pueden ser la tasa de ascenso, la velocidad o el rumbo.

Por tanto, para conocer datos sobre el dron que está sobrevolando una determinada zona del espacio aéreo más allá de simplemente su detección y distancia hasta el radar, es preciso el empleo de transpondedores incorporados en las UAS. Consecuentemente, los transpondedores modo A y modo C se suelen utilizar principalmente en aviación convencional, teniendo una importancia mayor en el campo de las aeronaves no tripuladas los transpondedores modo S y los de tipo ADS-B.

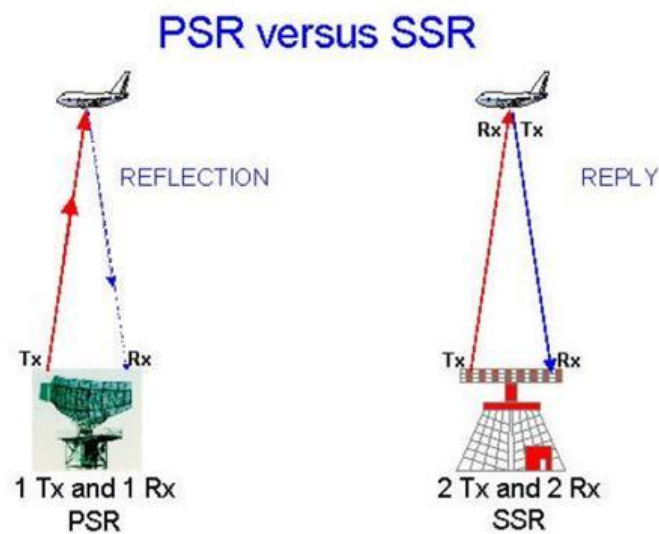


Figura 5.22: Diferencias entre radar primario y radar secundario (SSR). [55]

- Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B):** Por otro lado, existe otra tecnología gracias a la cual ya no es necesario que una estación en tierra esté emitiendo continuamente pulsos a modo de interrogación, como ocurre con el radar secundario. En su lugar, es la aeronave tripulada convencional o UAS quien emite continuamente señales con información relativa a su vector de estado.

La información que se emite por parte de la aeronave relativa a su posición se determina mediante la navegación por satélite.

El ADS-B ofrece una mayor fiabilidad, pues con este método ya no se produce la comunicación entre la estación en tierra y la aeronave, sino que también es capaz de informar a otras aeronaves cercanas de su situación. Esto se realiza mediante los siguientes sistemas:

- **Transpondedores ADS-B Out.** Este tipo de instrumentos están incorporados en las aeronaves, dotándolas de la capacidad de emitir información relativa a su vuelo y su identificación (latitud, longitud, altitud barométrica, etc).
- **Receptor ADS-B In.** Permiten a las aeronaves recibir señales emitidas por transpondedores ADS-B Out. De esta manera, los UAS pueden conocer el vector de estado de otros UAS cercanos durante el vuelo, lo que garantiza separaciones seguras entre ellos y facilita la toma de decisiones en vuelo para evitar colisiones.

Los equipos que se llevan a bordo de las aeronaves con funcionalidad ADS-B emiten en banda VHF, banda que ocupa un rango de frecuencias entre 30 y 300 MHz. El principal equipo utilizado en aeronaves se denomina 1090ES, que emite en una frecuencia de 1090 MHz, como ya hacían los transpondedores que captaba el SSR y que además cumple los requisitos estipulados por la OACI. [56]

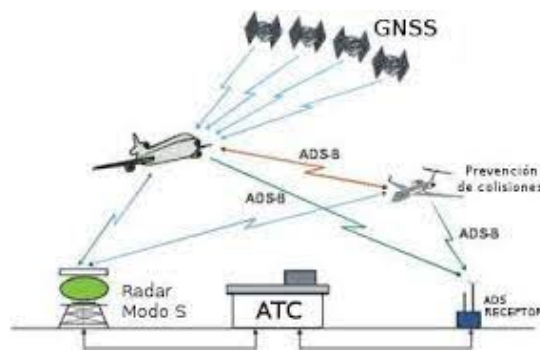


Figura 5.23: Esquema de funcionamiento ADS-B. [57]

Una vez se conoce el funcionamiento de las comunicaciones ADS-B, es posible destacar sus principales ventajas con respecto al SSR:

- **Comunicación directa.** En lugar de pasar por los sistemas de ATS a través de los datos que recoge el radar secundario, los UAS reciben las señales directamente emitidas de otras aeronaves, de manera que la información que llega a través de estos pulsos emitidos por los transpondedores ADS-B in son mucho más fiables, pues la información no necesita de intermediarios.
- **Reducción en el coste [56].** Es posible reducir el coste en infraestructura de los radares, pues ya no es necesario que estén emitiendo señales de interrogación constantemente. Así, todo el coste derivado de la emisión de potencia por parte de los radares desaparece. En su lugar, las estaciones en tierra serían únicamente antenas

receptoras ADS-B, cuyo coste de mantenimiento y consumo es más reducido. Estas antenas receptoras no requieren una elevada sensibilidad. [57] De esta forma, sería posible dotar a ciertas regiones de una mayor cobertura ADS-B pues, al tener estas antenas un coste menor, sería posible habilitar un mayor número de estaciones en tierra. Esto sería especialmente beneficioso para las aeronaves no tripuladas que, al ser en su gran mayoría de menor tamaño, presentan limitaciones a la hora de emitir señales con gran alcance debido a las limitaciones en la potencia de los transpondedores que deben llevar a bordo.

Como contrapartida, cabe destacar que estos sistemas dependen directamente de los sistemas de geolocalización (GNSS), por lo que, si existe algún problema para recibir las señales de los satélites que integran las redes GNSS, no sería posible hacer uso del ADS-B.

Por lo que respecta a las recomendaciones emitidas por la OACI⁸⁸, éstas hacen hincapié en la conveniencia de que los UAS lleven a bordo transpondedores cuyo funcionamiento obedezca a los mismos principios que emplean las aeronaves convencionales⁸⁹ y sean capaces de informar de la altitud, como hacen los transpondedores modo C y S.

Pese a que los transpondedores que utilizan algunos UAS cumplen las mismas funciones que los transpondedores tradicionales que se encuentran en la aviación comercial (respuesta ante señales de interrogación e información de identidad, altitud, etc.), sí existen algunas diferencias entre ambos tipos:

- En primer lugar, lógicamente, los transpondedores de los UAS suelen ser de un menor peso y tamaño para no afectar demasiado en su MMD, una variable que constituye una importante limitación.

La OACI ya recoge en una de sus circulares⁹⁰ la previsión de transpondedores de menor tamaño y peso que puedan ser incorporados en UAS más pequeños, sin repercutir tan negativamente en la MMD.

- Por otro lado, la potencia también suele ser menor en los transpondedores de los UAS. Esto se explica por las limitaciones en cuanto a las baterías que llevan incorporadas, cuyo peso no suele superar los 500 g o no suelen consumir más de 100 Wh [24] [25] [26] [27] de energía a no ser que se trate de drones de mayores dimensiones (y consecuentemente, de superiores marcados de clase).

⁸⁸Circular OACI 328-AN/190, página 46, “Sistemas de vigilancia”. [9]

⁸⁹Anexo 10 de la OACI, Volumen IV — Sistemas de vigilancia y anticolidión. [58]

⁹⁰Circular OACI 328-AN/190, página 46, “Sistemas de vigilancia”. [9]

- Al tener menor potencia, el alcance de los transpondedores también se ve afectado. El radar secundario tiene mayor alcance que el primario para una misma potencia [59] y, por su parte, el transpondedor que incorpora la aeronave tiene un rango que, además de depender de otros parámetros como la longitud de onda (relacionado con la frecuencia de las ondas a las que se está emitiendo), queda determinado por la potencia de este propio elemento.
- Protocolos de comunicación. Los UAS también utilizan protocolos de comunicación. Al igual que ocurre con la aviación tripulada, en un espacio aéreo controlado es necesario que se cumplan los requisitos de comunicaciones ATC entre el piloto, en este caso remoto, y la aeronave no tripulada. Para ello, se designan ciertas bandas de frecuencia a fin de evitar interferencias. Estos requisitos de comunicación variarán atendiendo a la operación y el tipo de espacio aéreo concretos en los que se desarrolle el vuelo. [9]

A este respecto, la AESA ha elaborado una guía en la que se proporciona información a los operadores de RPAS para que puedan llevar a cabo convenientemente los procesos de autorización de dichas operaciones. En este sentido, esta guía se basa en la metodología SORA (Specific Operation Risk Assessment) [60], elaborado también por la AESA conjuntamente con la Comisión Europea con el objetivo de disponer de un marco de regulación de riesgos durante las operaciones con RPAS, permitiendo así la toma de decisiones que permitan reducir este tipo de peligros. Esta metodología se compone en total de diez pasos en los que se lleva a cabo una evaluación de los riesgos tanto en tierra como en aire [61] y solo se aplica bajo ciertos condicionantes (riesgo de operación medio, categoría específica y necesidad de autorización por parte de la autoridad competente).

Específicamente, el paso 7 de este procedimiento, “Requisitos de rendimiento de las mitigaciones tácticas” o, en sus siglas en inglés, TMPR, consiste en la consideración de medidas tácticas en periodos cortos de tiempo durante la operación con el objetivo de disminuir el riesgo de colisión en aire.

Si se trata de situaciones de vuelo de tipo VLOS (“Visual Line of Sight”), se puede plantear como medida de prevención el procedimiento “See and Avoid”. Asimismo, se podrán tomar medidas complementarias que quedarán definidas por el espacio aéreo en el que se esté realizando la operación, como se recoge en la Tabla 5.

Lugar de la operación	Mitigaciones tácticas en vuelos VBLOS/EVLOS
Zonas urbanas	<ul style="list-style-type: none"> - Incorporación de un observador adicional. - Reducción al máximo del tiempo en el que la aeronave se encuentre expuesta. - Posible incorporación de radio aeronáutica para la detección en la zona de aeronaves tripuladas.
Espacio aéreo controlado o FIZ	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobación de NOTAM para conocer todos los peligros y advertencias del momento de la operación. - Contacto necesario con ATC en espacios clase A, B, C y D para que autoricen la operación. - Escucha activa en la frecuencia ATC en cualquier operación, siempre. - Capacidad de aviso por radio a ATS ante la pérdida de control del RPAS. - Asistencia barométrica. Empleo de un barómetro para el cálculo de la altura AGL para complementar la información que ofrece el GPS. - Uso de transpondedor modo S, siendo obligado su uso si la operación se desarrolla en BVLOS.
Entornos aeroportuarios	<ul style="list-style-type: none"> - Mitigaciones tácticas consideradas para el espacio aéreo controlado. - Geo-caging/geo-fencing - Uso de equipamientos de mejora de geoconsciencia (como ADSB-in).

Tabla 5: Mitigaciones tácticas complementarias a VLOS/BVLOS. ⁹¹

En las operaciones en las que se tenga línea visual con la aeronave, es posible aplicar el ya introducido principio de “See and Avoid”, para actuar de manera inmediata evitando accidentes. Como se desprende de la Tabla 5, existen varias acciones o precauciones que pueden ser de aplicación adicionalmente, y muchas de estas medidas se relacionan con la escucha o comunicación con los servicios de tráfico aéreo, o incluso con la detección directa de las aeronaves que vuelan cerca de la zona de operación, a través del empleo de dispositivos como los transpondedores, o como los receptores ADS-B in.

Para el caso de los transpondedores, éstos deberán incluirse, según estipula la AESA en aeronaves de menos de 25 kg que realicen vuelos más allá de la visual del piloto (BVLOS) en el espacio aéreo controlado. Se tratará en ese caso de transpondedores modo S.

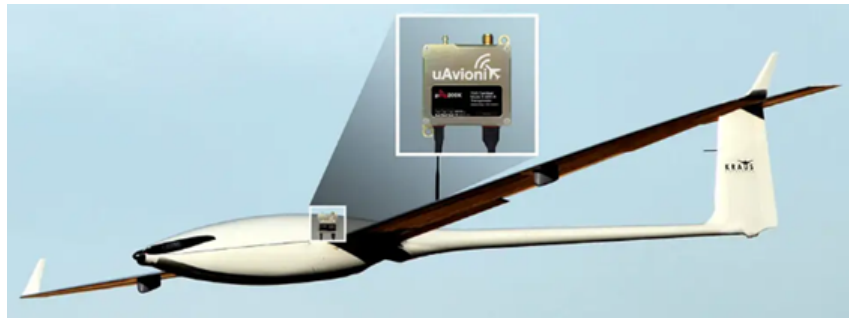


Figura 5.24: Representación de la incorporación de un transpondedor “ping200” de uAvionics en un UAV. [62]

En el mercado existen transpondedores modo S ADS-B específicamente diseñados para UAS capaces de ser detectados tanto por sistemas en tierra, por medio de radares secundarios (SSR), como por sistemas que otras aeronaves incorporan a bordo como TCAS o receptores ADS-B in. Igualmente pueden integrarse en el controlador del RPAS. [63] En la actualidad, empresas de sistemas de aviónica como Sagatech Avionics o como uAvionix están desarrollando transpondedores y/o receptores, y se encuentran realizando estudios para su integración y aplicación en el campo de los UAS, algo que, como se ha visto, ya empieza a ser una exigencia marcada por las entidades regulatorias.

Transpondedor	Empresa	Especificaciones
ping-200X	uAvionix	Transpondedor modo S certificado con ADS-B out
ZPX-A	uAvionix	Transpondedor modo 3/A, C, S, certificado con ADS-B out
MXS	Sagatech Avionics	Microtranspondedor modos A, C, S ADS-B in/out
MX12B	Sagatech Avionics	Microtranspondedor modo 5 IFF, ADS-B in/out

Tabla 6: Ejemplos de transpondedores actuales incorporados en FPAS. [63]

Como aparece reflejado en la Tabla 6, modelos como el microtranspondedor ZPX-A [64] concebido para aplicaciones de UAS en defensa o el transpondedor modo S ADS-B out ping-200X [63] son claros ejemplos del desarrollo de esta tecnología. Todos ellos están certificados por la Federal Aviation Administration (FAA) de los EEUU. El modelo ping-200X, de dimensiones milimétricas, es bastante ligero (en torno a 50 g) y puede incorporarse incluso en UAS de marcado de clase 1 y 2 sin imponer restricciones de peso muy significativas. Ofrece hasta 250W de potencia de transmisión y solo llega a consumir 1.5W de potencia, llegando a funcionar en altitudes de hasta 35000 ft. [62]

Si no resultara posible adaptar el planteamiento “See and avoid”, como en supuestos de vuelos BVLOS, pueden implementarse otro tipo de mecanismos de mitigación de riesgos, como la escucha o comunicación con los servicios de tráfico aéreo (ATS) o la utilización

de sistemas de evasión de colisiones que puedan llevar a bordo las aeronaves, como TCAS, ACAS-X, MIDCAS u otros sistemas ACAS. [65]

Además de las opciones anteriores, también se plantean otra clase de alternativas denominadas “Sense and Avoid”. Este tipo de tecnología se implementa en aeronaves no tripuladas y se basa en la detección de obstáculos, además de en la navegación autónoma. Esto último se debe a que, una vez que estos sistemas determinan que el riesgo de colisión es elevado e inminente, están capacitados para crear una nueva trayectoria de vuelo de manera autónoma.

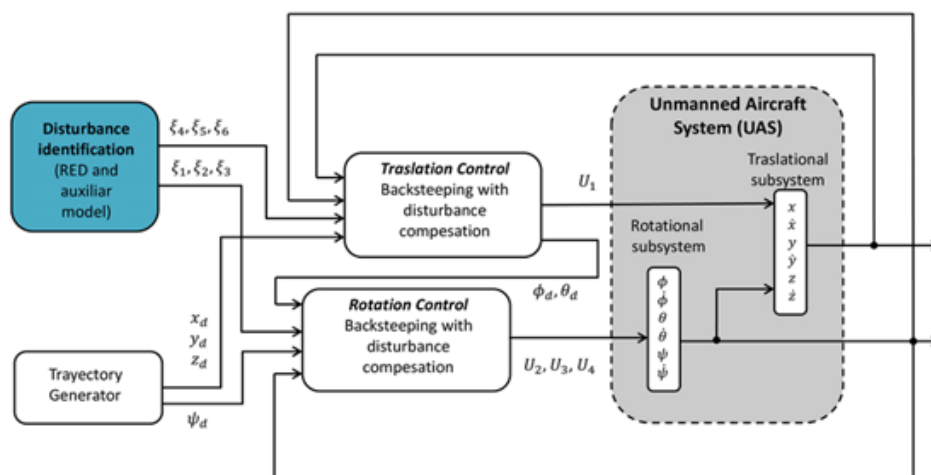


Figura 5.25: Ejemplo de un diagrama de control UAS para generar trayectorias alternativas tras detección de obstáculos. [66]

En el proceso de detección de obstáculos se pueden diferenciar dos grupos principales: [67]

- **Fuentes cooperativas.** Estas fuentes son aeronaves tripuladas o no tripuladas que periódicamente emiten información acerca de su posición, identidad, etc. Los UAS son capaces de detectar dicha información con sistemas como TCAS o receptores ADS-B.
- **Fuentes no cooperativas.** Estas fuentes no son aeronaves, sino obstáculos, ya sean edificios u elementos naturales del entorno (árboles, montañas, etc.), constituyendo una amenaza mayor para la seguridad en la medida en que no emiten información que pueda ser detectada por sistemas de anticollisión integrados en el UAS. También entrarían dentro de este grupo los UAS que no se encontraran emitiendo señales para ser detectados.

En consecuencia, es imprescindible para aplicar esta tecnología que la aeronave no tripulada incorpore sensores que sean capaces de detectar fuentes no cooperativas. Como

punto positivo, cabe mencionar que estos sensores obtendrán datos que no dependen de otros sistemas, pues los datos que emiten las fuentes cooperativas en ocasiones pueden incluir errores e incertidumbres que acaban transmitiéndose como información fiable, no siéndolo en realidad, con el riesgo de colisión que ello implica.

Por ejemplo, se utiliza un dron que dispone de ADS-B out que emite datos en vuelo sobre su altitud calculados mediante un altímetro que presenta un gran margen de incertidumbre. Esta información se recibe por otro dron que lleva incorporado un receptor ADS-B in. En este caso el segundo dron no tendría ninguna forma de validar si esa información es fiable, asumiendo que la posición en altura transmitida por el primer dron es la correcta, tomando a su vez decisiones que afectan a su trayectoria a partir de datos no plenamente contrastados. En cambio si el segundo dron se cruzara con una fuente no cooperativa como una montaña en su trayectoria, únicamente habría de confiar en los datos obtenidos por sus propios sensores sin depender de datos procedentes de fuentes externas de dudosa fiabilidad.

Los sensores para la detección de fuentes no cooperativas, a su vez, se subdividen en dos grupos: [68]

- **Sensores activos.** Su principio de funcionamiento se basa en la emisión de señales que llegan y rebotan en los obstáculos para más tarde ser captadas por los sensores. Ejemplos de esta categoría pueden ser los ultrasonidos, o el LIDAR (“Light Detection And Ranging”). Generalmente, los sensores activos, si bien son capaces de calcular la distancia a la que se encuentran los obstáculos con bastante precisión, suelen ser pesados y requieren mayor potencia, por lo que su uso es más común en UAS de mayor tamaño.
- **Sensores pasivos.** Los datos que llegan a estos sensores provienen directamente de la emisión de señales involuntarias por los propios obstáculos, como ocurre con el tratamiento de datos mediante cámaras o cámaras infrarrojas.

Por su parte, los sensores pasivos suelen ser más ligeros y consumir menor potencia, por lo su integración en UAS de menor tamaño es más sencilla. Como contrapartida, la estimación de la distancia a los obstáculos suele ser menos precisa que la que ofrecen los sensores activos.

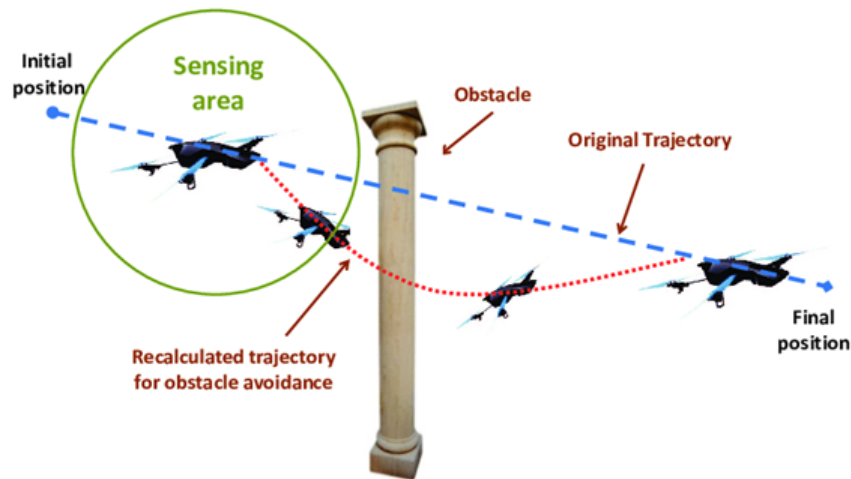


Figura 5.26: Ejemplo de trayectoria alternativa calculada por el controlador del UAS tras haberse detectado un obstáculo que constituye una fuente no cooperativa. [69]

Además, estos sistemas para la gestión y evitación de colisiones pueden ser a su vez de dos tipos. Por un lado, los denominados “Airborne-Based Sense and Avoid” (ABSAA) están formados por los sistemas que incorporan los UAS a bordo de lo que ya se ha hablado. Por otro lado, existen los sistemas en tierra, también llamados “Ground-Based Sense and Avoid” (GBSAA). Estos últimos están formados por una red de estaciones en tierra que se dedican a detectar aeronaves en el espacio aéreo. Si se produce la detección de alguna, pueden transmitir información a las demás aeronaves cercanas con indicaciones o restricciones con el fin de evitar colisiones con la primera.

5.2.5. Comunicación

La OACI recomienda que los mismos requisitos de continuidad, integridad y fiabilidad que se exigen normalmente en los sistemas de comunicación de las aeronaves tripuladas que operan en el espacio aéreo controlado resulten igualmente de aplicación a los UAS en sus comunicaciones entre los servicios de ATC y el piloto a distancia.⁹²

También se prevé la necesidad por parte del piloto que opere en el espacio aéreo controlado de disponer de los siguientes protocolos de comunicación:

- **Enlace de datos C2 con la aeronave que esté pilotando a distancia.** Este tipo de enlace de datos de tipo bidireccional entre ambas partes permite tanto al piloto enviar comandos al dron para controlarlo, así como recibir información actualizada del propio dron para que el piloto, conociendo estas condiciones de vuelo y de su entorno, pueda tomar decisiones que afecten a su navegación. Este tipo de enlace se

⁹²Cir 328 AN/190. Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS). Apartado “Comunicaciones Aeronáuticas”, apartados 6.30 - 6.43. [9]

basa en la transferencia de datos mediante el uso de Wifi o radiofrecuencia, entre otras.

- **Enlace entre el piloto a distancia y los servicios de tráfico aéreo (ATS).** Este tipo de enlace puede ser de datos o de voz. Para lograr dicho enlace, cabe plantear dos posibilidades:
 - Comunicaciones aire-tierra. Es el supuesto más común en el que el enlace se consigue mediante la transmisión de voz/datos entre ATS y el piloto y tiene lugar a través del propio RPAS. Para ello, pueden ser necesario equipos específicos a bordo.
 - Comunicaciones tierra-tierra entre ATS y el piloto remoto. Se puede conseguir mediante la comunicación entre las estaciones de servicio de tráfico aéreo y las estaciones en las que se ubiquen los pilotos remotos, debiendo estas dos estaciones encontrarse comunicadas mediante cableado. Se trata de un planteamiento más complejo para garantizar las comunicaciones, debido a la falta de desarrollo y el coste de este tipo de infraestructuras de comunicación.

En todo caso, para poder acceder a los certificados de aeronavegabilidad, el solicitante deberá probar que el diseño empleado en su caso cumple con las necesidades de comunicación y con los requerimientos de ATS.

Estos requerimientos acaban teniendo un especial impacto en las UAS de menor tamaño, ya que puede resultar muy complicado incorporar equipos de radio VHF que les permitan comunicarse con los servicios de tráfico aéreo.

5.3. Análisis de mitigación de riesgos

Estudiadas las características que afectan a la navegación de RPAS, resulta imprescindible detenerse en los requerimientos de seguridad que pueden condicionar la operación.

Para enfocar este análisis, en primer lugar, se toma como espacio aéreo de la operación el controlado por ENAIRE, que ha establecido unas normas que prevén la realización de estudios o evaluaciones de seguridad. Seguidamente, se examina la metodología SORA que puede integrarse dentro del esquema de mitigación de riesgos en espacios aéreos controlados por ENAIRE (Paso 1) y aplicarse igualmente a operaciones de RPAS de la categoría específica (riesgo medio y necesidad de autorización) ya sea en espacios aéreos controlados o no controlados y con independencia de quién sea la autoridad competente.

5.3.1. Mitigación de riesgos en el espacio aéreo controlado

ENAIRE facilita información a través de su página web para los operadores que deseen volar en este espacio aéreo controlado por ENAIRE. Concretamente, describe los pasos que se deben seguir: [70]

1. Realización de un Estudio de Seguridad (EAS) o bien una Evaluación y Atenuación del Riesgo de Operación (EARO), que será diferente en función de la categoría del UAS, así como del escenario estándar que se contemple dentro de la categoría específica.

ENAIRE facilita además una plantilla en la que se presentan diferentes medidas de atenuación de manera tabulada, tanto tácticas como estratégicas, según las categorías de operación, escenarios estándar y condiciones de operación, como se muestra en la Figura 9. Esta plantilla puede ser de gran utilidad para cumplimentar debidamente la EARO.

2. Una vez se ha cumplimentado el estudio de seguridad, se debe enviar a ENAIRE, junto con el certificado de registro del UAS para que su división de seguridad se ponga en contacto con el operador y puedan trabajar de manera coordinada en el desarrollo de la operación a realizar.

Se debe tener en cuenta que, para ciertas categorías de operación y clases de RPAS, puede ser exigible también una autorización de la AESA para poder realizar el vuelo.

3. Posteriormente, se debe comprobar a dónde se debe dirigir la solicitud de la operación. Esto dependerá de la entidad encargada de controlar el espacio aéreo en el que se desee realizar el vuelo. Dicha entidad será la encargada de indicar los requisitos que se deberán cumplir para poder realizar la operación.

1. MEDIDAS DE ATENUACIÓN

CÓDIGO	TIPO DE ATENUACIÓN	MEDIDA DE ATENUACIÓN	ÁMBITO DE APLICACIÓN		OBSERVACIONES
			Categoría operacional	CONOPS	
MAE01	Estratégica	Disponer de los conocimientos necesarios para obtener la calificación de radiofonista , acreditados mediante habilitación anotada en una licencia de piloto o certificación emitida por una organización de formación aprobada (ATO) o escuela de ultraligeros.	- Categoría abierta - STS-ES-01 - STS-ES-02 - Categoría específica bajo autorización	- Fuera de las distancias de seguridad de aeródromos - Dentro de las distancias de seguridad de aeródromos	Art. 33.1.e RD 1036/2017
MAE02	Estratégica	Acreditar un conocimiento adecuado del idioma o idiomas utilizados en las comunicaciones entre el controlador y la aeronave, atendiendo a las condiciones operativas del espacio aéreo en el que se realice la operación.	- Categoría abierta - STS-ES-01 - STS-ES-02 - Categoría específica bajo autorización	- Fuera de las distancias de seguridad de aeródromos - Dentro de las distancias de seguridad de aeródromos	Art. 33.1.e RD 1036/2017
MAE03	Estratégica	Disponer de un equipo de comunicaciones adecuado capaz de sostener comunicaciones bidireccionales con las estaciones aeronáuticas y en las frecuencias indicadas para cumplir los requisitos aplicables al espacio aéreo en que se opere.	- Categoría abierta - STS-ES-01 - STS-ES-02 - Categoría específica bajo autorización	- Fuera de las distancias de seguridad de aeródromos - Dentro de las distancias de seguridad de aeródromos	Art. 46.1.a RD 1180/2018

Tabla 7: Ejemplo de algunas medidas de atenuación estratégicas propuestas por la AESA en según la categoría operacional del RPAS, así como de las condiciones de operación. [61]

4. Con anterioridad al vuelo se deben comprobar los NOTAM (“Notice to Airmen”), esto es, comunicaciones que permiten mantener a los operadores informados sobre circunstancias que puedan poner en peligro la seguridad aérea (clausuras temporales de aeródromos y aeropuertos, fallo de ciertos sistemas de navegación como radioayudas, etc.). Nótese que los NOTAM hacen referencia a circunstancias del espacio aéreo para cada momento, por lo que su consulta reflejará una foto fija que podría experimentar cambios hasta el mismo día de la operación. En la Figura 5.27 se presenta un ejemplo para el día 08/12/2023.
5. También se deberá formular un plan de vuelo (FPL) que, según se establece en la

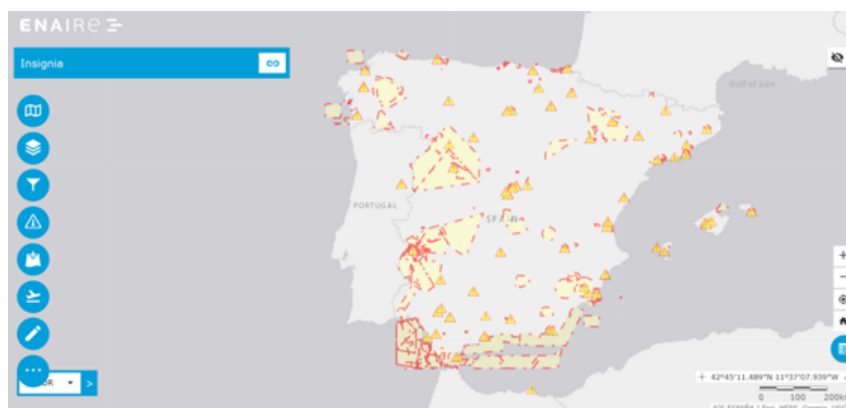


Figura 5.27: Representación de puntos y áreas NOTAM en la aplicación Enaire Insignia. [7]

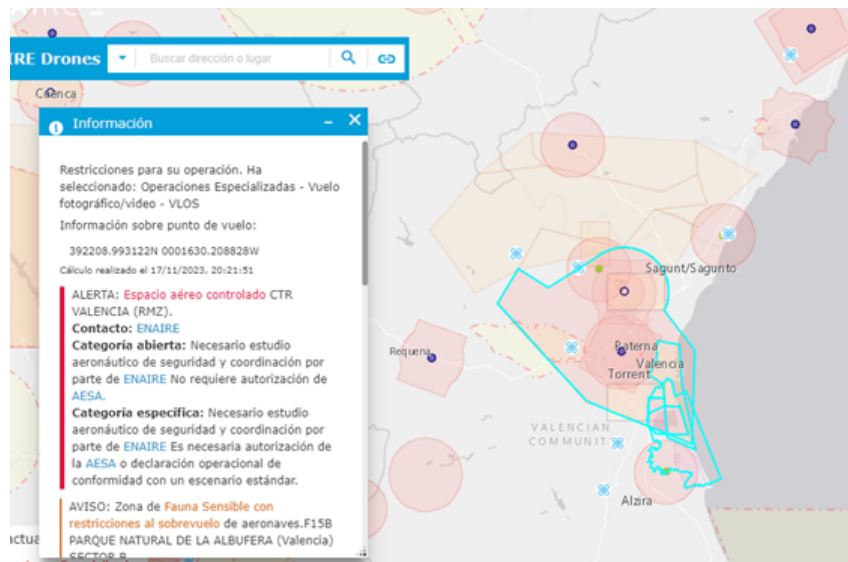


Figura 5.28: Aplicación ENAIRE drones. La aplicación muestra el CTR de Valencia como zona perteneciente al espacio aéreo controlado, indicando que los RPAS no pueden por lo general operar en esta zona. [45]

regulación vigente [71], debe presentarse con carácter obligatorio para operaciones con UAS dentro del espacio aéreo controlado y de manera opcional en el espacio aéreo no controlado. Este proceso puede realizarse de manera telemática a través de la aplicación ICARO XXI de ENAIRE.

6. Finalmente, durante la operación, el operador de RPAS debe mantenerse a la escucha por radio del control de tránsito aéreo y seguir sus instrucciones.

A través de la aplicación de ENAIRE drones, los particulares podrían verificar si la zona en la que desean desarrollar el vuelo de su RPAS se sitúa dentro o fuera del espacio aéreo controlado y actuar en consecuencia. En la Figura 5.28, a modo de ejemplo, se ha seleccionado el CTR de Valencia, definido por las regiones del espacio aéreo cercanas tanto al aeropuerto de Aeropuerto de Valencia–Manises (LEVC), más al sur, como por el Helipuerto Militar del Ejército de Tierra, situado más al noreste. Para realizar operaciones dentro de esta región del espacio aéreo, sería necesario realizar el proceso descrito anteriormente.

5.3.2. Metodología SORA

Desarrollada por la AESA, la metodología SORA (“Specific Operations Risk Assessment”) se emplea en el campo de la navegación aérea con UAS con el objetivo de evaluar los riesgos asociados a cada operación, riesgos que se ven influenciados por las condiciones

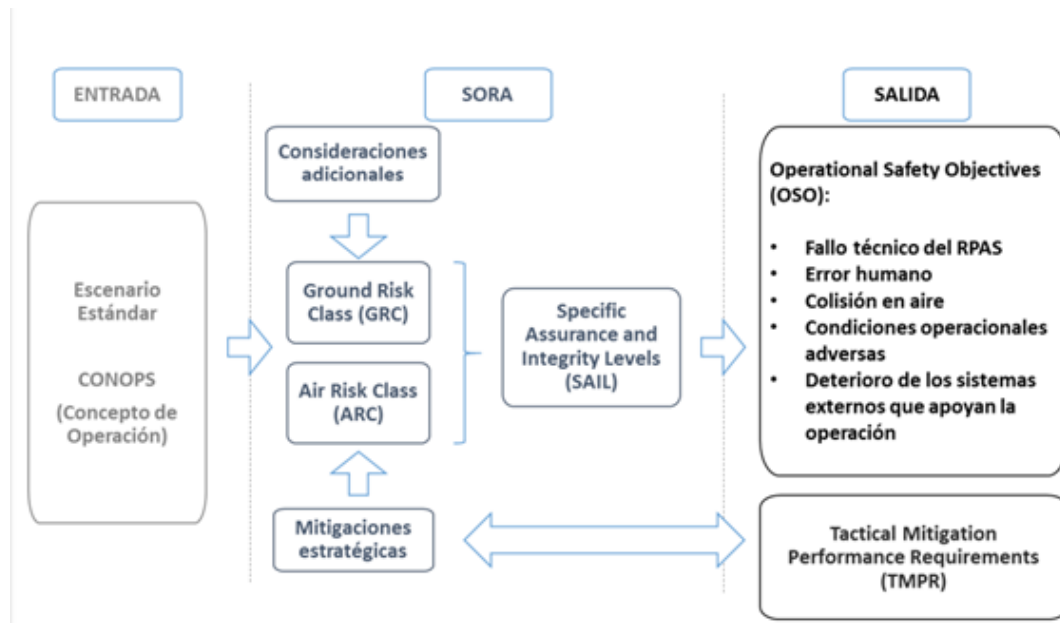


Figura 5.29: Esquema de la metodología SORA. [61]

de la misma, como el tipo de aeronave, el espacio aéreo en la que se va a desarrollar, la proximidad a entornos urbanos, etc.

Al identificar los posibles riesgos existentes tanto en aire como en tierra durante la operación, se pueden definir las mitigaciones tácticas o estratégicas, esto es, las acciones necesarias para conseguir disminuir tales riesgos. Dichas acciones pueden ser de diferentes tipos, tales como la inclusión de equipamiento determinado a bordo, la modificación del diseño de la aeronave, restricciones en los planes de vuelo, etc.

Hay que recalcar que esta metodología se pretende plantear como una guía de los principales principios y prácticas para la gestión de la seguridad aérea, como ya aconseja la OACI en el Manual de gestión de la Seguridad operacional (Doc. 9859) [72], diseñado para aplicarse a la navegación tripulada. No obstante, SORA se dirige a las operaciones RPAS, si bien exclusivamente a las operaciones con RPAS en categoría específica, es decir, con un nivel de riesgo medio y con la necesidad de autorización por parte de la autoridad competente antes de realizar la operación.

Como se desprende del esquema de la Figura 5.29, mediante el empleo de esta metodología es posible agrupar en cinco grupos principales todas las amenazas a la seguridad que puedan producirse durante la operación. Estos grupos son:

- Fallo técnico del UAS.
- Error humano.
- Colisión en el aire.

Volumen del espacio aéreo	Operación que abarca	Tipo de procedimientos
Geografía de vuelo	Normal	<ul style="list-style-type: none"> - Los que se derivan de la operación normal, teniendo en cuenta errores de posicionamiento, sistemas de autopiloto, etc. - Riesgos particulares (lluvia, nieve, etc.)
Volumen de contención	Anormal	<ul style="list-style-type: none"> - Vuelta a casa. - Espera en estacionario. - Aterrizaje automático. - Distancias en caso de control manual. - Tiempos de reacción de los sistemas que incorpore el RPAS.
Margen	Emergencia	<ul style="list-style-type: none"> - Procedimientos de emergencia: <ul style="list-style-type: none"> a. Aterrizaje inmediato. b. Sistemas de reducción de energía de impacto. - Tiempos de reacción de los sistemas que incorpore el RPAS.

Tabla 8: Tipos de procedimientos que pueden realizarse en vuelo dependiendo del tipo de volumen definido por SORA. [61]

- Condiciones adversas de la operación.
- Deterioro de los sistemas externos que apoyan a la operación.

Para llevar a cabo correctamente un análisis SORA conviene estudiar ciertos conceptos relativos al espacio de seguridad que rodea al RPAS en vuelo:

A partir de la información presente en la Tabla 8 se concluye que los procedimientos de contingencia se podrían realizar dentro del volumen de contención y excedería de la geografía de vuelo (volumen operacional), mientras que los procedimientos de emergencia se pueden llevar a cabo hasta el límite definido por los márgenes de emergencia.

Más allá de este volumen de contingencia, se deberán mantener márgenes por riesgo en aire o en tierra, dependiendo de si el RPAS se encontrara próximo a zonas del espacio aéreo en las que no puede acceder o a zonas pobladas, respectivamente. Además, la distancia mínima que debe mantenerse entre estos dos últimos tipos de zonas (espacio aéreo no permitido y zonas pobladas) debe medirse desde el límite del volumen operacional. Todo esto se constata en la Figura 5.30.

Para el cálculo de la distancia que el dron debe mantener con el espacio aéreo adyacente o las áreas susceptibles de constituir un riesgo en tierra, el dron puede estar equipado con sensores y sistemas que le proporcionen esta información, aunque también puede

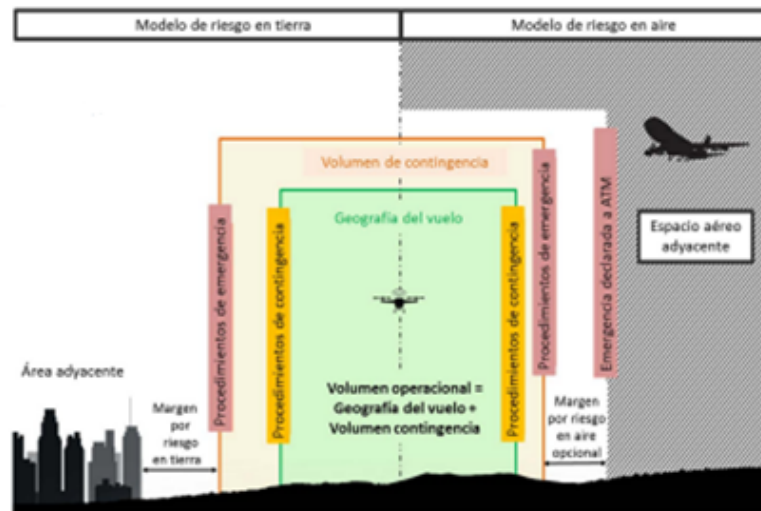


Figura 5.30: Esquema de los volúmenes alrededor del dron según la metodología SORA. [61]

ser el propio piloto de la aeronave el que estime la distancia. Esta distancia depende esencialmente de la altura máxima a la que le está permitido volar a la aeronave, además de su MTOW.

La metodología objeto de estudio se basa en el cumplimiento de una serie de pasos, que se detallan a continuación: [73]

- **Preevaluación de la solicitud.** La metodología SORA será aplicable si la operación a realizar:
 - No se puede enmarcar dentro de un escenario estándar.
 - No entraña un nivel de riesgo muy elevado.
 - No requiere un certificado de aeronavegabilidad.
 - No se requiere comunicación previa por parte de la autoridad competente.

En definitiva, sólo resultará de aplicación si la operación involucra a un RPAS en categoría específica.

- **Paso 1. Descripción de ConOps** (“Concepto de operaciones”). Se debe describir el tipo de operación que se desea realizar, además de facilitar información técnica relevante acerca del RPAS. Se describirán los siguientes aspectos:
 - MTOW.
 - Altura de vuelo. Se debe describir si la operación pretende superar los 120 metros de altura.

- Espacio aéreo en el que se desarrollará la operación (espacio aéreo controlado, FIZ, etc.).
 - Posibilidad de que la operación se desarrolle en zonas cercanas a aglomeraciones.
 - Vuelo diurno o nocturno.
 - Formación y experiencia del piloto del RPAS.
- **Paso 2. Determinación del GRC intrínseco.** Se pretende identificar el tipo de riesgo intrínseco de colisión en tierra, (*intrinsic “Ground Risk Class”*). Se trata de un valor entre 1 y 10 que queda definido por el riesgo en el aterrizaje, es decir, el riesgo de que una persona acabe siendo golpeada por el RPA. Para determinar este riesgo se debe prestar atención tanto a las condiciones del vuelo como al tamaño, dimensiones, y MTOW y energía cinética del dron.
- **Paso 3.** En este paso se consideran ciertas medidas de mitigación que reducen el riesgo en tierra. Entre ellas, se encuentran las siguientes:
- Reducción de los efectos de impacto al aterrizaje, así como de su amortiguación.
 - Medidas estratégicas de mitigación en base a la densidad de población potencialmente afectada por un aterrizaje forzoso.
 - Desarrollo de un Plan de Respuesta a la Emergencia. En este plan se deberá describir un sistema para la terminación segura del vuelo⁹³.
 - Provisión de un dispositivo de limitación de energía de impacto si se trata de operaciones sobre aglomeraciones.
- Con las medidas anteriores, debe ser posible reducir el GRC al menos a nivel 7 para que pueda seguir siendo analizada desde la metodología SORA.
- **Paso 4.** Determinación del ARC inicial. Se trata de valorar cuál es el riesgo intrínseco de colisión en aire (*“Air Risk Class”*). Depende de los siguientes factores:
- Espacio aéreo en el que se realiza la operación. Siguiendo esta metodología, aparece una nueva clasificación diferente de la clase de espacio aéreo con la que tradicionalmente se ha trabajado en navegación aérea (A, B, C, D, E, F, G): las Categorías de Encuentro en Espacio Aéreo (AEC o “Airspace Encounter Category”). Cada una de las categorías se diferencia de las demás por el riesgo de colisión.

⁹³Estudio de Seguridad para Operaciones Declarativas, página 4 [74]

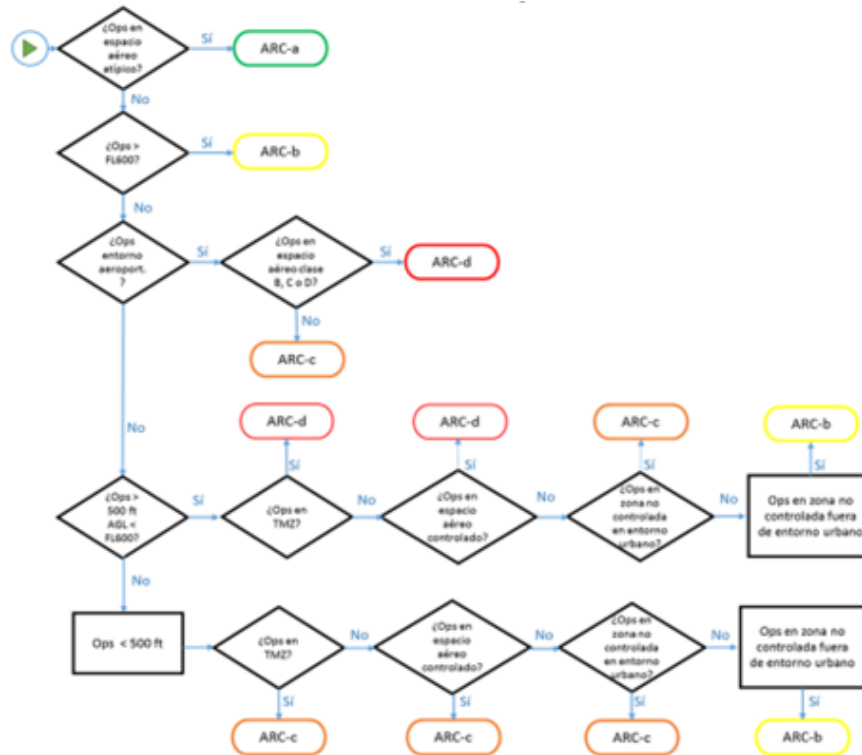


Figura 5.31: Determinación del ARC. [61]

- Altitud.
- Cercanía a aeropuertos
- Cercanía a zonas urbanas.
- Presencia de ATC.

A continuación, en la Figura 5.31, se puede observar cómo el ARC puede variar entre las categorías ARC-a, ARC-b, ARC-c, ARC-d, yendo de menor a mayor riesgo de colisión. En el diagrama se observa claramente que los factores citados anteriormente son determinantes a la hora de establecer la categoría de ARC.

Puede darse el caso de que el dron opere en zonas conocidas como Espacio Aéreo Atípico, esto es, zonas donde no es muy frecuente que se produzcan encuentros entre aeronaves tripuladas y RPA. Si se consigue demostrar que el espacio aéreo donde se pretende realizar la operación cumple los requisitos de frecuencia de encuentros con aeronaves tripuladas que definen en SORA al espacio aéreo atípico (probabilidad de encuentro mínima), entonces se podrá reducir la categoría de riesgo aéreo a ARC-a (categoría inferior en la escala de riesgo). [75]

- **Paso 5. Determinación del ARC final.** Para reducir el riesgo en aire se deben lle-



Figura 5.32: Reducción del ARC hasta niveles menores mediante la implementación de mitigaciones estratégicas. [61]

ARC Final	Requisitos de rendimiento de las mitigaciones tácticas (TMPR)	Nivel de robustez de TMPR
ARC-d	Alta	Alta
ARC-c	Media	Media
ARC-b	Baja	Baja
ARC-a	Sin requisitos	Sin requisitos

Tabla 9: Nivel de robustez de los sistemas del RPAS según el nivel de riesgo residual de colisión en el aire. [75]

var a cabo las denominadas mitigaciones estratégicas y tácticas. Para poder reducir el ARC solo se pueden aplicar mitigaciones estratégicas tales como restricciones operacionales definidas o bien por el propio piloto o bien por la autoridad competente. Este tipo de mitigaciones son las que se adoptan con anterioridad a la operación. El riesgo de colisión en aire persistente tras haber aplicado las medidas de mitigación estratégica deberá afrontarse mediante la aplicación de las mitigaciones tácticas. Cabe mencionar a este respecto que la implementación de mitigaciones estratégicas no podrá reducir el ARC hasta un nivel ARC-a.

- **Paso 6. Mitigaciones tácticas.** Tras haber aplicado las mitigaciones estratégicas, sólo permanece durante la operación un riesgo residual de colisión que debe ser reducido mediante las mitigaciones tácticas. Para ello, se han de considerar requisitos tanto de robustez como de desempeño (TMPR o “Mitigation Performance Requirement”). Esto afecta a aspectos como la detección, la ejecución de las acciones tomadas por el piloto o el feedback que éste acaba recibiendo y son características del sistema. El tipo de robustez y TMPR dependen del riesgo residual de colisión y, en consecuencia, afectan al ARC final.
- **Paso 7. Determinación del SAIL.** Este parámetro, evaluado en una escala entre el 1 y el 6 evalúa el nivel de garantía específica e integridad (“*Specific Assurance and Integrity Level*”). Depende de los pasos anteriores pues viene determinado por:
 - GRC final.

Nº del OSO (en línea con el Anexo E)	Barrera a la amenaza	SAIL					
		I	II	III	IV	V	VI
Problema técnico del RPAS							
OSO#1	Asegurar que el operador es competente y / o ha demostrado su capacidad como tal	O	L	M	H	H	H
OSO#2	El RPAS es fabricado por una entidad competente y / o aprobada	O	O	L	M	H	H
OSO#3	El mantenimiento del RPAS se realiza por una entidad competente y/o probada	L	L	M	M	H	H
OSO#4	El RPAS ha sido desarrollado según estándares de diseño reconocidos	O	O	O	L	M	H
OSO#6	El rendimiento del enlace C3 es adecuado para la operación	O	L	L	M	H	H

Tabla 10: Primeros objetivos de operación (OSO) con su nivel de robustez requerido según el valor del SAIL. [75]

- ARC final.
 - ConOps.
- **Paso 8. Determinación de los OSO (“Operational Safety Objectives”).** Se trata de objetivos de seguridad operacional derivados de los siguientes posibles incidentes:
- Deterioro de sistemas internos del dron.
 - Deterioro de sistemas externos al dron.
 - Errores humanos.
 - Condiciones climatológicas adversas.

Se debe, por tanto, comprobar que estos objetivos se relacionan convenientemente con los niveles de robustez que requiere el SAIL que se haya determinado (variando entre nivel alto, medio o bajo). En la Tabla 10 se puede apreciar un ejemplo de los primeros OSO, junto con el nivel de robustez requerida según el SAIL.

- **Punto 9. Espacio aéreo adyacente.** Además de considerar el riesgo que pueda suponer una situación de emergencia en el espacio aéreo de la operación, también se debe contemplar la posibilidad de que esta emergencia implique una invasión del espacio aéreo colindante. Se deberá además justificar que las mitigaciones estratégicas que se vayan a tomar puedan garantizar que el RPAS se mantiene en el espacio aéreo para el que se ha planificado la operación.

Para garantizar que se cumplen estas mitigaciones puede bastar con la incorporación se sistemas de medición de altura y detección de obstáculos cuyos errores deberán

estar permitidos dentro de la robustez requerida en la operación. Si se desea mayor robustez, una posible solución puede ser el empleo de sistemas GNSS.

■ **Punto 10. Presentación del estudio SORA ante las autoridades competentes.**

Como se ha explicado en los puntos anteriores, la metodología SORA desarrollada por la AESA consiste en un método útil y cada vez más utilizado en la determinación de los riesgos, tanto en aire como en tierra que pueden afectar a las operaciones con RPAS. Se trata de un estudio para operaciones con riesgo medio en el que se deben definir las principales acciones para reducir el riesgo de accidentes que debe presentarse a la autoridad competente para su aprobación antes de llevar a cabo el vuelo.

5.4. Sensorización

5.4.1. Principales sensores

A lo largo de las últimas décadas, el desarrollo tecnológico de los UAS se ha ido sofisticando mediante la incorporación progresiva de un mayor número de sensores a bordo. Este hecho no solo repercute positivamente en la seguridad aérea, al permitir a los drones tomar consciencia del entorno en que se encuentran, sino que además ha abierto un amplio abanico de aplicaciones, algunas de las cuales todavía se encuentran en vías de desarrollo.

A continuación, se enumeran los principales sensores que suelen incorporar los drones en la actualidad:

- Magnetómetros.** Los magnetómetros son sensores capaces de ofrecer información sobre la orientación del propio sistema. Para ello, se miden intensidades o direcciones de los campos magnéticos. Si este tipo de sensores permite registrar dichas magnitudes a lo largo del tiempo, se consideran variómetros magnéticos. Estos instrumentos son útiles y se pueden incorporar a los sistemas de navegación inercial de las aeronaves o UAS debido a su capacidad de medición y detección del campo magnético terrestre.

Existen diversos magnetómetros, cada uno con particulares principios de funcionamiento, como los magnetómetros de protones, los de bombeo óptico, o los fluxgate, y se emplean ampliamente en aplicaciones que implican la captación de datos mediante drones como puede ocurrir en geofísica. [76]

Nº del OSO (en línea con el Anexo E)	Barrera a la amenaza	SAIL					
		I	II	III	IV	V	VI
Problema técnico del RPAS							
OSO#1	Asegurar que el operador es competente y / o ha demostrado su capacidad como tal	O	L	M	H	H	H
OSO#2	El RPAS es fabricado por una entidad competente y / o aprobada	O	O	L	M	H	H
OSO#3	El mantenimiento del RPAS se realiza por una entidad competente y/o probada	L	L	M	M	H	H
OSO#4	El RPAS ha sido desarrollado según estándares de diseño reconocidos	O	O	O	L	M	H
OSO#6	El rendimiento del enlace C3 es adecuado para la operación	O	L	L	M	H	H

Figura 5.33: Ejemplo de sensor magnetómetro de tipo fluxgate en un dron para sondeo geofísico. [77]

- Sensores inerciales** [78]

Estos sensores están constituidos por acelerómetros y giroscopios, y son capaces de medir tanto la aceleración lineal como la velocidad angular de la aeronave, respectivamente.

- **Acelerómetros.** El fundamento físico mediante el cual los acelerómetros son capaces de medir el cambio en las velocidades lineales del dron es el principio de inercia. Los acelerómetros incorporan masas en su interior que, al verse aceleradas, generan unas fuerzas de inercia que quedan registradas. En la actualidad, la información dada por estas fuerzas de inercia generadas por la aceleración de la masa se suele tratar y almacenar digitalmente. Los principales acelerómetros que se utilizan en la actualidad se relacionan seguidamente:

1. **Acelerómetros capacitivos.** Éstos determinan la capacitancia entre placas de material conductor situados en la masa acelerada y en el extremo del sensor, mediante la medición de una corriente eléctrica. La capacitancia está relacionada matemáticamente con la fuerza de inercia que experimenta la masa al verse acelerada.

Este tipo de acelerómetros se emplean generalmente en dispositivos que se desplazan, como son los drones. No obstante, no suelen presentar mucha precisión en las mediciones, por lo que para algunos UAS más sofisticados puede no ser la solución idónea.



Figura 5.34: Ejemplo de acelerómetro capacitivo MEMS Digital. [79]

2. **Acelerómetros piezoeléctricos.** Dichos acelerómetros emplean material piezoeléctrico entre la masa acelerada y los límites del sensor, de manera que cuando la distancia entre éstos se reduzca o amplíe debido a la aceleración de la masa, entonces el material piezoeléctrico generará una corriente eléctrica que podrá medirse y que, de nuevo, estará relacionada con la fuerza de inercia que experimenta la masa.

Los sensores acelerómetros piezoeléctricos son de aplicación, sobre todo, en equipos industriales por requerir mayor precisión y sensibilidad en sus mediciones. En consecuencia, proporcionan una elevada exactitud y resultan más caros que los anteriores. Estos sensores, a diferencia de los capacitivos, no se ven tan afectados por las variaciones de temperatura.

3. **Acelerómetros piezoresistivos.** Poseen la facultad de cambiar su resistencia eléctrica al verse deformados. Situando piezoresistores en las uniones entre la masa que se ve acelerada y el marco del acelerómetro, será posible, pasando una corriente eléctrica, medir la variación en la resistencia eléctrica de los piezoresistores, cuantificando así el valor de las fuerzas inerciales a las que está sometida la masa en cada instante.

Este tipo de acelerómetros son capaces de medir en un amplio rango de valores. Otra ventaja que poseen es la medición de señales que evolucionan a un ritmo lento, y por esta razón se emplean bastante en sistemas de navegación inercial de aeronaves.

- **Giroscopios.** Esencialmente, los giroscopios son sensores capaces de medir velocidades angulares respecto a sistemas de referencia inerciales. Este tipo de sistemas son muy útiles debido a una propiedad esencial: al rotar, conservan mucho mejor la orientación de su eje de rotación cuando se le aplican momentos externos.

Los principios físicos que intervienen en estos instrumentos son los propios de los cuerpos giroscópicos: la inercia giroscópica y la precesión. Los giroscopios poseen generalmente un rotor, un eje de rotación y diferentes soportes o balancines que pueden moverse libremente con respecto al rotor. De esta forma, si el rotor del giroscopio comienza a rotar, el principio de la inercia giroscópica expone que la parte del rotor permanecerá fija, girando siempre de forma perpendicular al eje de rotación, pudiendo los soportes y demás partes del giroscopio rotar libremente. Este efecto se ve incrementado por la velocidad de rotación a la que se encuentra girando el rotor o disco, además de al momento de inercia del disco. [80] [81]

Por su parte, el principio de la precesión establece que, si se aplica una fuerza sobre el disco del giroscopio, el efecto de ésta se puede observar siempre a 90° de la posición en la que se aplicó, en el sentido de la rotación del giroscopio.

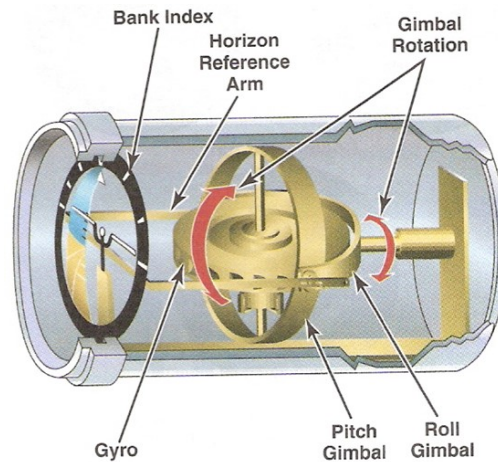


Figura 5.35: Representación de un giroscopio de una aeronave. [81]

Existen diferentes ejemplos de giroscopios en función de su tipología (de desplazamiento libres o anclados o de variación). Estos tienen una gran aplicación en aeronaves, tanto en ligeras, donde se aplican en indicadores como los de actitud, de rumbo o el coordinador de virajes, así como en aeronaves de mayor complejidad, donde están presentes en sistemas de referencia y navegación inercial o en sistemas de piloto automático. [82]

Los sistemas de navegación inercial que incorporan los UAS pueden estimar la posición del mismo conociendo la posición inicial. Esto se debe a que, al ser capaces de estimar las aceleraciones lineales del dron, es posible integrar esta aceleración para calcular la velocidad del objeto y, de nuevo, integrar para conocer la posición. Cabe mencionar que el error en posición crece, pues no es únicamente un error derivado de las características inherentes al sensor o de la naturaleza del ruido que éste capte (error aleatorio), que aparecen en la señal captada, sino que también se debe a errores por tratamiento numérico en los procesos de integración, en el proceso conocido como propagación de errores. Estos procesos numéricos de integración acaban amplificando el error que originariamente aparecía en la señal captada. Para tener en cuenta estos efectos y aplicar las correcciones convenientes, es importante tener presente cuáles son las características fundamentales del ruido que aparece en la señal original, además de cómo se propaga a través de los procesos de integración.

Por otro lado, para obtener estimaciones correctas de la posición, debe conocerse también la orientación del objeto. Esto se consigue con los giroscopios, que son capaces de medir velocidades angulares. Así, conociendo la orientación del dron como condición inicial, será posible estimar la orientación de la aeronave en cada instante.

Por todo lo anterior, resulta imprescindible contar con aparatos (acelerómetros y giroscopios) de elevada precisión, ya que, si el error en la medición de estas magnitudes es elevado, entonces el error en posiciones y orientaciones será todavía mayor por la propagación de los errores en el proceso de integración. [83]

- **IMU.** Las unidades de medición inercial (“Inertial Measurement Unit”) son dispositivos electrónicos que emplean los instrumentos de medición inercial que se han comentado con anterioridad para proporcionar a los UAS la capacidad de posicionarse en el espacio. Por lo tanto, los UAS utilizan estos sistemas, o bien para complementar la información que ofrenden los sistemas GNSS, o bien como sistema de posicionamiento principal si no se dispone de los anteriores.

La IMU está integrada en el autopiloto, por lo que participa en el sistema de control de vuelo de los UAS. Esto es así porque es posible contar con información relativa a las fuerzas de inercia (de los acelerómetros), además de información sobre las velocidades angulares (de los giroscopios) a partir de los sistemas que componen la IMU. Si se incorporan datos provenientes de otros sistemas de medición como magnetómetros, receptores GNSS para conocer las posiciones con una elevada precisión, y otro tipo de sensores, será posible aplicar métodos de filtrado de Kalman para estimar datos correspondientes a la navegación tales como las actitudes, las tasas angulares, las velocidades o las posiciones, estimando así las trayectorias que efectúen estas aeronaves. [84] El procedimiento que se acaba de comentar teniendo en cuenta tanto la IMU como los sistemas GNSS y otros instrumentos, así como la aplicación del filtrado de Kalman efectuado por un microprocesador se lleva a cabo mediante el Sistema de Navegación Inercial. [85] Dicho procedimiento queda representado a continuación, en la Figura 5.36.

Por lo que respecta a la IMU, sus sensores con frecuencia se basan en la tecnología **MEMS** (“**Micro Electromechanic Systems**”). [85] En esencia, se trata de tecnología que tiene como objetivo el diseño y fabricación de microsensores y microactuadores. Se trata de la elaboración de componentes mecánicos que tengan la capacidad de responder ante señales eléctricas, variaciones en campos magnéticos o variaciones de temperatura. Ejemplos de la aplicación de esta tecnología en las IMU se encuentran en los acelerómetros [86](capacitivos, piezoeléctricos y piezoresistivos).



Figura 5.36: Funcionamiento de los Sistemas de Navegación Inerciales (INS). Esquema del flujo de datos procedente de la IMU y de otros sensores para estimar posiciones, velocidades, actitudes y otros parámetros relativos a la navegación de los UAS mediante el filtrado de Kalman. [84]

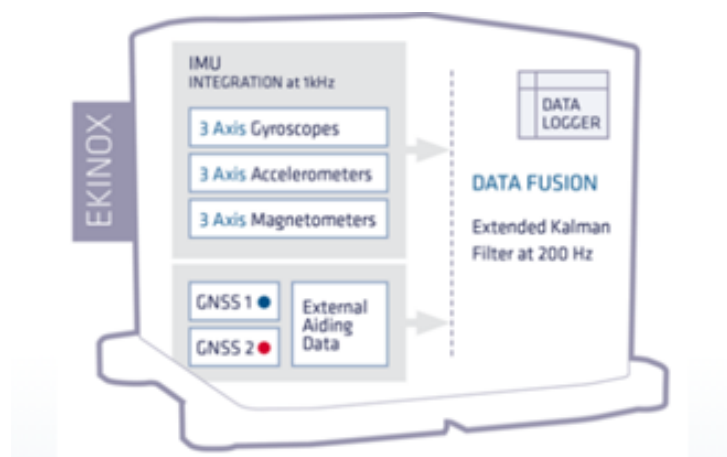


Figura 5.37: Ejemplo de funcionamiento de un Sistema de Navegación Inercial (INS) de la compañía SGBsystems. [85]

Por lo que respecta a la integración de receptores GNSS en los sistemas de navegación inercial, estos pueden ser de gran utilidad, pues algunos fabricantes ofrecen en sus modelos de INS industriales receptores GNSS de doble antena que pueden ofrecer precisiones incluso centimétricas en las circunstancias más desfavorables para los sistemas GNSS. [87] Esto es de especial importancia en la medida en la que la obtención de datos de mayor precisión, unido a los que ofrecen otros sistemas como los de la IMU, afecta positivamente a las estimaciones de trayectorias del filtrado de Kalman, pues los datos que se consideran como observaciones del sistema en el filtro de Kalman gozan no solamente de mayor precisión, sino también de mayor

robustez. Todo ello repercute en mejores estimaciones del estado del sistema, así como en actualizaciones de estas estimaciones más fiables a medida que pasa el tiempo. [88]

Por último, para drones que realicen operaciones en las que se requiera una elevada precisión en su navegación, se deberá contar con IMUs que presenten un buen rendimiento, así como resistencia a vibraciones (por ejemplo, mediante aislamiento mecánico de las vibraciones) y estabilidad frente a variaciones de temperatura. En algunos casos también se emplean autopilotos que presentan redundancia de IMUs para tener una mayor fiabilidad de las aceleraciones lineales y angulares del sistema. [84] También cabe mencionar que generalmente es necesario calibrar la IMU del dron después de que este haya sufrido malos aterrizajes o golpes, o si observamos comportamientos peculiares que no se corresponde con las órdenes que estamos ejecutando sobre él durante el vuelo. [89]

- **Sensores LIDAR:**

La tecnología de los sistemas LIDAR (por sus siglas en inglés “Light Detection And Ranging”), que incorporan algunos drones, se basa en la emisión de pulsos de luz láser por parte del dron, que se encuentra sobrevolando un terreno determinado. Estos pulsos de luz láser acaban impactados en dicho terreno o en los objetos que se encuentran en su camino y, posteriormente rebotan, regresando así al sensor del sistema LIDAR. De esta manera, este sistema se encarga de medir el tiempo que pasa entre emisión y recepción de los pulsos de luz, pues esta magnitud multiplicada por la velocidad de la luz proporciona la distancia a la que los diferentes objetos con los que rebotan las ráfagas de luz láser se encuentran del emisor. Dichas mediciones de las distancias se caracterizan por tener una alta precisión. [90]



Figura 5.38: Dron en vuelo con sistema LIDAR incorporado. [91]

En concreto, el Escáner Láser Aerotransportado (ALS) que forma parte del sistema LIDAR es el encargado de tomar mediciones del terreno. Lo que ocurre es que los fotones que son reflejados por los objetos son identificados por el escáner e interpretados como impulsos electromagnéticos. Todo ello permite la obtención de datos que representan el terreno sobrevolado. Los datos se recaban en forma de nubes de puntos con coordenadas en posición y en elevación que representan la orografía con una elevada precisión y detalle, incluyendo incluso vegetación, pendientes en el terreno, etc., para finalmente poder generar con esos datos modelos digitales del terreno. Estas nubes de puntos se suelen captar en intervalos de ciertos metros y la densidad de puntos y, por tanto, de información del terreno que se está analizando se ven incrementados a medida que disminuye la velocidad del dron que lo sobrevuela, así como a medida que aumenta el número de pasadas o sobrevuelos de la zona que se pretende caracterizar. [92]

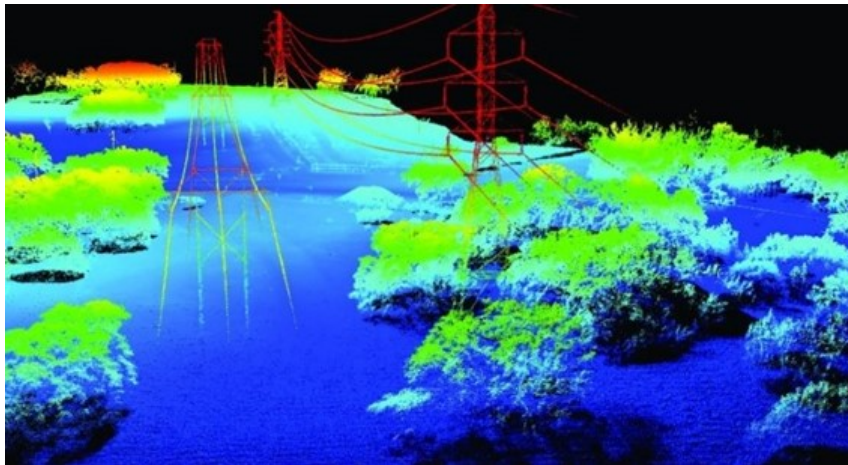


Figura 5.39: Ejemplo de captación de datos mediante LIDAR. [93]

Durante el proceso de captación de datos, el dron recopila miles de puntos por segundo para representar el entorno que lo rodea. Sin embargo, la recepción de datos de gran precisión por el sensor LIDAR resultaría inútil si no es posible geolocalizar el UAS que lo incorpora, así como determinar su orientación. Si eso se consigue, se podrá asociar los puntos del terreno a un sistema de referencia (WGS84, ETRS89, etc.) para que cada punto quedara caracterizado completamente mediante unas coordenadas concretas.

Para conocer la posición del dron se hace uso, por una parte, de un receptor GPS incorporado en la aeronave, así como de estaciones de control terrestres (estaciones GNSS). Al conocer con exactitud la posición de estas estaciones de control, es posible determinar mediante el receptor GPS la posición del dron. Por otro lado, para conocer la orientación del dron y del sensor LIDAR en cada momento, se hace uso

de los Sistemas de Navegación Inerciales (acelerómetros y giroscopios) presentes en la IMU.

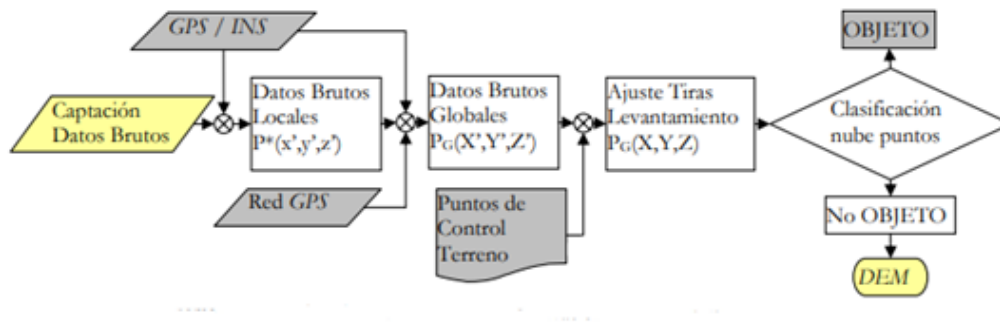


Figura 5.40: Proceso para generar un modelo digital del terreno o modelo digital de elevaciones (DEM).

En la Figura 5.41 se representa el procedimiento de levantamiento LIDAR que se acaba de exponer. Como se observa a partir de esta figura, el proceso se basa en los componentes referidos, a saber: el receptor GPS y la estación en tierra para determinar la posición del sensor, la IMU para conocer su orientación, y el propio Escáner Láser Aerotransportado (ALS) para la captación de la nube de puntos. [92]

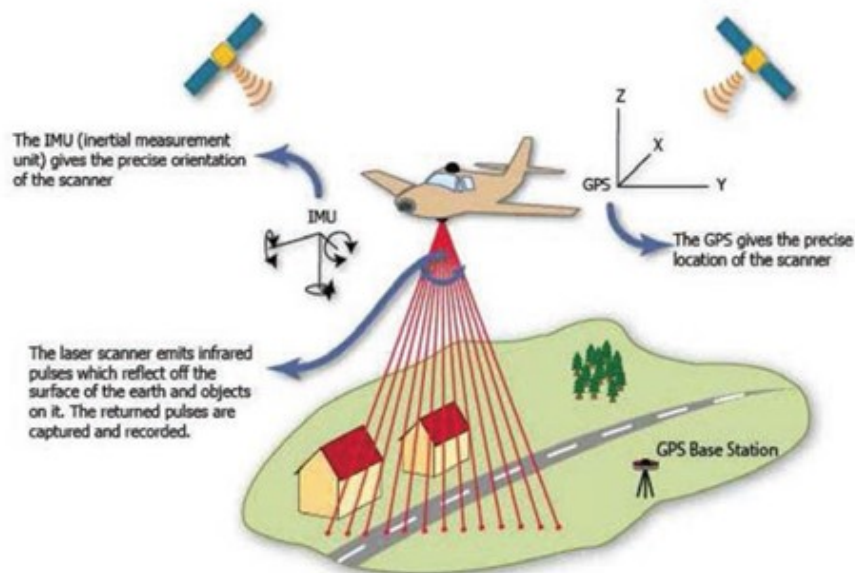


Figura 5.41: Esquema del proceso de un levantamiento LIDAR mediante una aeronave. [92]

Puede resultar conveniente llevar a cabo un proceso planificación de vuelo previo

al mismo. Dicho proceso, así como el correspondiente al tratamiento de los datos LIDAR pueden efectuarse mediante software específico. [92]

En la Figura 5.42 se representa precisamente un cabezal láser del propio Escáner Láser Aerotransportado (ALS) de la empresa Velodyne, con un rango de hasta 100 m. [94]



Figura 5.42: Sensor Velodyne's Puck LIDAR. [95]

La capacidad que ofrece esta tecnología para la caracterización del terreno, o simplemente el entorno que los UAS tienen a su alrededor presenta a día de hoy numerosas aplicaciones. En primer lugar, por lo que se refiere a la caracterización del terreno, resulta de gran utilidad en campos como la topografía, geología o cartografía, desarrollando, con la información captada por los drones, planos y mapas con gran realismo. Las inspecciones de terreno llevadas a cabo por estas aeronaves que generalmente son capaces de sobrevolar por zonas de difícil acceso encuentran también una importante aplicación en el desarrollo de proyectos urbanos y otras infraestructuras, así como en proyectos forestales o de organización del territorio y gestión de recursos naturales. [96]

Finalmente, cabe destacar que este tipo de tecnología presenta ventajas frente a otros métodos de captación de datos del entorno de la aeronave: [97]

- Capacidad de adquisición de los datos en malas condiciones atmosféricas. No es necesario tener una buena visibilidad del entorno como ocurre con otros métodos como la telemetría. Tanto es así que es posible realizar los barridos para la captación de datos incluso durante vuelos nocturnos.
- Posibilidad de obtener información del terreno de buena calidad de forma rápida y eficiente.
- Posibilidad de obtener información en zonas de difícil acceso.

■ Sensores de ultrasonido.

Los sensores de ultrasonido son utilizados por los drones principalmente en los procesos de detección y evasión de obstáculos durante el vuelo.

Su principio de funcionamiento se puede asimilar al que se emplea en otros sistemas, pues se basa en obtener un cálculo de la distancia a los objetos que se encuentran en el entorno del dron a partir del tiempo que transcurre entre la emisión y recepción por parte del sensor. A diferencia del LIDAR, en este caso no se emiten pulsos de luz, sino ondas ultrasónicas (ondas que viajan con frecuencias superiores a las que el ser humano es capaz de detectar, por encima de los 20000 Hz). Basándose en la emisión de la onda ultrasónica por el sensor y en el fenómeno de reflexión de las ondas (en el que éstas no varían su velocidad ni frecuencia al toparse con un medio diferente al de propagación), dicha onda rebota en el objeto más cercano y llega de nuevo al sensor ultrasónico. [98] [99]

Conociendo el tiempo entre emisión de la onda y la recepción del eco, además de la velocidad del sonido en el medio de propagación (aire), es posible conocer la distancia a los objetos que detecta el sensor.

Este tipo de sensores se suelen utilizar en drones de gamas baja o media, pues su implementación es relativamente simple. A continuación, se comentan sus principales ventajas e inconvenientes. [99] [98]

● Ventajas:

1. Coste moderado, pues es posible encontrar en el mercado sensores de buena calidad a precios muy asequibles, llegando los sensores más sofisticados y de muy buena calidad a costar cerca de unos cientos de euros.

Por ejemplo, el sensor SKU HCSR04 ofertado por diversas empresas de suministro de componentes electrónicos, constituye un sensor de ultrasonido ampliamente utilizado por su precio asequible y buena calidad. Opera con tensiones de 5V y su rango de medición se sitúa entre los 2 cm y los 4.5 m. Con precisiones centimétricas, es posible adquirirlo por precios inferiores a los 10 euros. [100]



Figura 5.43: Sensor de ultrasonidos SKU HCSR04 con placa Arduino. [100]

2. Funcionamiento en condiciones de poca visibilidad. Se trata de sensores que no dependen de la luz solar.
3. Precisión. Generalmente, estos sensores ofrecen elevadas precisiones en sus mediciones para distancias cortas.
4. Respuesta rápida. Al no ser necesario un tratamiento de los datos muy exhaustiva como ocurría en el caso del LIDAR, los tiempos de respuesta suelen ser reducidos, por lo que son de gran utilidad, como ya se ha comentado, en sistemas de evasión de obstáculos de manera automática.
5. Mejora en las operaciones en vuelo del dron. Además de la evasión de obstáculos, estos sensores pueden emplearse también para que el UAS permanezca a una altitud constante durante el vuelo, mediante la detección de la superficie que tiene justo debajo, así como la determinación de la distancia a la que se encuentra de ésta. Dicha capacidad también resulta de gran ayuda para llevar a cabo aterrizajes precisos.
6. Seguridad. La capacidad de detección de objetos resulta de gran ayuda para garantizar que los vuelos se desarrollan de manera segura, sobre todo si no se tiene un conocimiento muy preciso de la posición del dron en situaciones en las que no se tiene información GPS.
7. Facilidad de implementación. Si se dispone de uno o varios sensores ultrasónicos, es factible implementar un sistema de evitación de obstáculos con relativa facilidad en el UAS. Continuando con el ejemplo anterior del sensor SKU HCSR04, se pueden combinar varios sensores para captar información sobre el entorno en varias direcciones. El esquema eléctrico de la Figura 5.44 muestra cómo interaccionan dichos sensores con una placa

Arduino, donde se programan las rutinas para la evitación de obstáculos, realizándose continuamente tareas de detección de objetos y estimación de distancias. De ser detectado un objeto e identificada una posible colisión, la propia placa se encargaría de transmitir esta información al controlador de vuelo para que la trayectoria pueda modificarse. [101]

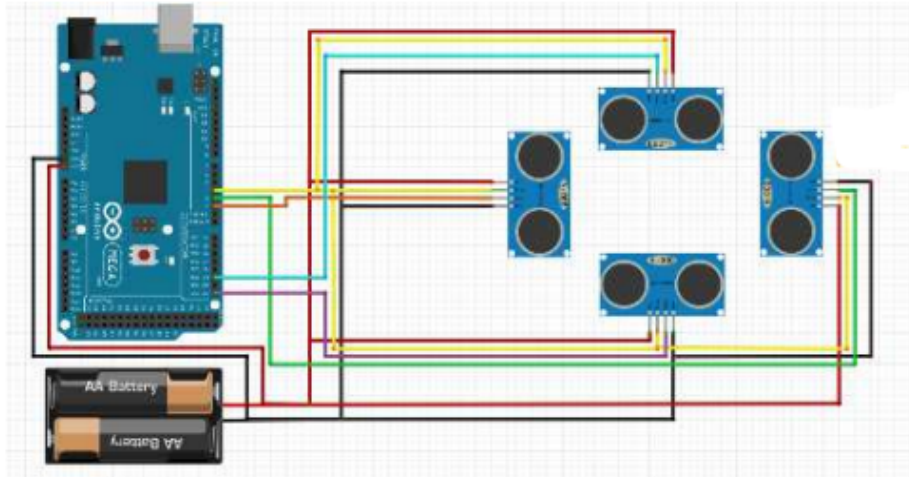


Figura 5.44: Esquema de conexiones entre cuatro sensores ultrasónicos SKU HCSR04 con la placa Arduino de evasión de obstáculos. [101]

- **Desventajas:**

1. **Limitaciones a largas distancias.** Generalmente estos sensores son menos precisos a medida que aumenta la distancia entre el foco emisor de la onda y el objeto con el que ésta va a rebotar. Este fenómeno se debe a que la onda es emitida por el sensor en un haz cónico, con lo que el área que atraviesa un mismo frente de onda al aumentar la distancia es cada vez mayor. Por lo tanto, a grandes distancias, al aumentar considerablemente el área en el que un objeto puede situarse, resultará más difícil conocer la situación exacta del mismo. Más aun, si existe más de un objeto dentro de dicha área de detección, el sensor solo detectará el más cercano, incurriendo en una disminución de la fiabilidad de estos sensores a grandes distancias.

Por otro lado, a distancias cortas la fiabilidad en la detección de ecos reflejados de objetos muy pequeños es limitada.

2. **Superficies absorbentes.** Al basarse este método en la detección del eco recibido tras haber impactado en el objeto que se pretende detectar, se debe tener en cuenta que existen blancos que presentan propiedades absorbentes del sonido que no serán captados por el receptor. Este hecho

constituye una importante desventaja respecto a otros sensores como los infrarrojos.

3. La **sensibilidad** de los sensores puede verse reducida en exteriores por efectos meteorológicos adversos.
4. **Inclinación de los objetos.** Es importante prestar atención a las propiedades de los blancos que deben reflejar las ondas ultrasónicas. Puede darse el caso de que haya objetos orientados de forma que la onda, una vez haya impactado con el objeto, sea devuelta en una dirección diferente de tal manera que este eco reflejado no llegue de nuevo al sensor ultrasónico, quedando ese blanco invisible para el receptor. Asimismo, los objetos sobre las superficies que se encuentran paralelos a ellas son más difíciles de detectar, pues se confunden con éstas, mientras que los que se sitúan perpendicularmente serán identificados más fácilmente.

Por todo lo anterior, cabe recalcar que, pese a presentar varias ventajas, estos sensores también tienen ciertos inconvenientes que influyen en su imprecisión en ciertas situaciones y, sobre todo, a grandes distancias. Por ello, resulta conveniente combinar la información proveniente de ellos con otros como los infrarrojos o con otros sistemas como el GPS para garantizar la seguridad de las operaciones.

■ **Sensores infrarrojos.**

Por su parte, los sensores infrarrojos se basan en la emisión de radiación lumínica infrarroja, de menor frecuencia que la luz visible, mediante un emisor LED. El diodo fotorreceptor es el encargado de captar la luz que ha rebotado en el objeto detectado. Es posible determinar las distancias a tales objetos conociendo la cantidad de radiación que han sido reflejada por ellos y captada por el diodo fotorreceptor. [102]

A continuación, se exponen sus principales ventajas e inconvenientes: [103] [98]

● **Ventajas:**

1. **Coste reducido.** Se trata de sensores utilizados generalmente en drones de gama media y alta con precios muy económicos. Por ejemplo, en el mercado es posible encontrar por los propios fabricantes de drones modelos para incorporar a sus productos como el módulo infrarrojo para detección de obstáculos DJI FPV, por precios por debajo de los 15 euros, como se muestra en la Figura 5.45



Figura 5.45: Módulo infrarrojo para detección de obstáculos DJI FPV. [104]

2. Son capaces de funcionar en condiciones de escasa iluminación y muchos sensores pueden ajustar la **sensibilidad** del receptor al gusto del consumidor.
 3. Son de gran utilidad en **detección a distancias cortas**, con rangos de detección de unas decenas de centímetros (ente 50 y 100 cm).
 4. **Facilidad de implementación y empleo.**
- **Desventajas:**
 1. **Alcance limitado.** Limitación en la detección de objetos por encima de unas decenas de metros.
 2. **Detección direccional.** Solo son capaces de detectar sensores que se sitúan justo enfrente del propio sensor, en la dirección en la que se emite la radiación infrarroja.
 3. **Sensibilidad a condiciones atmosféricas** como cambios de temperatura.
 4. **Sensibilidad a la luz solar**, que también emite energía en el espectro infrarrojo. Por esta razón, los sensores infrarrojos se utilizan mayoritariamente en interiores.
 5. **Influencia de las características del objeto.** Los objetos muy oscuros apenas reflejan la luz infrarroja que ha sido emitida por el LED, de manera que son más difíciles de detectar.
 6. **Fallo de este tipo de sensores en condiciones atmosféricas adversas** (niebla, fuerte lluvia, etc.).

Debido a las importantes limitaciones que afectan a los sensores infrarrojos, que no se dan en otros sensores como los ultrasónicos, resulta muy atractiva la combinación

de ambos tipos de sensores en sistemas de evasión de obstáculos, procesando las señales de ambas fuentes para aumentar así la seguridad y fiabilidad.

■ Sensores de presión barométrica.

Estos sensores son capaces de ofrecer estimaciones de altitud sobre el nivel del mar a partir de la presión atmosférica que registran. Debido a que este sensor ofrece información de altitud, es común que se utilice junto con los sensores de medición inerciales (acelerómetros y giroscopios) para que el dron vuele de forma precisa. [105]

Se puedan calcular altitudes gracias a datos de presión atmosférica debido a que el aire disminuye linealmente a medida que se incrementa la altitud. Al existir una menor densidad de aire alrededor del dron, la presión que las moléculas ejercen sobre el mismo también es menor y, en consecuencia, el valor de presión medida por el sensor en vuelo es menor al que se registra a nivel del mar.

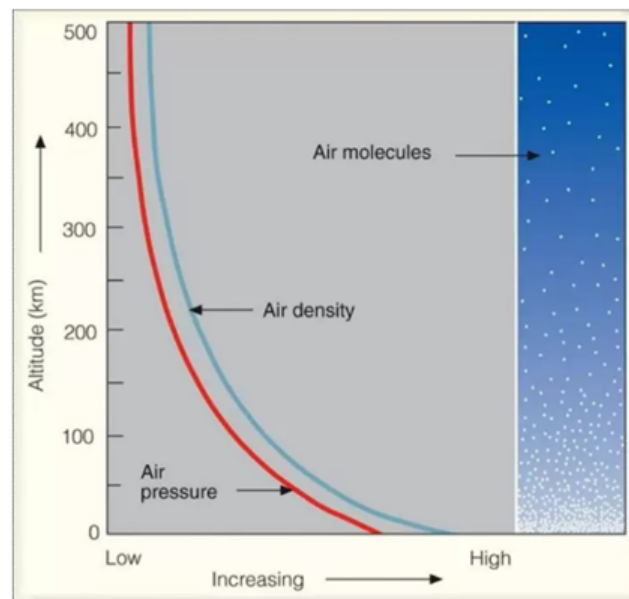


Figura 5.46: Variación de la densidad y la presión atmosférica con la altitud. [106]

Por otro lado, existen otros factores que también influyen en la presión, como son la temperatura y, en menor medida, la humedad. Es por ello que, generalmente, estos sensores también incorporan otros que miden la temperatura para tener en cuenta su influencia en el ambiente y conseguir lecturas de presión más fiables. [106]

El principio de funcionamiento de los sensores barométricos consiste en la utilización de una membrana deformable sobre la que el aire ejerce presión. Dicha membrana

deforma a su vez un material piezoresistivo, que tiene la facultad de variar su resistencia eléctrica al verse deformado. Midiendo continuamente la tensión de entrada (tensión enviada al sensor, generalmente 5V) y la de salida del material piezoresistivo (comprendida entre 0 y 5 V), se registran las variaciones en la deformación a lo largo del tiempo y, por tanto, las variaciones de presión. Además, mediante la aplicación de modelos matemáticos como los que definen las condiciones atmosféricas estándar, se llega a conocer la altitud a partir de la presión registrada. [106] [105]

Ejemplo de sensores barométricos es el BMP180, capaz de medir presiones absolutas, además de temperaturas para llevar a cabo las correcciones oportunas, teniendo en cuenta su influencia en la presión. Dicho sensor presenta rangos de medición entre 300 y 1100 hPa (por debajo de la presión atmosférica a nivel del mar, de entorno a los 1013 hPa y, desde luego, por debajo de las presiones que mide el dron a medida que aumenta su altitud en vuelo) y con una precisión notable para ese tipo de aplicaciones (1 hPa y 1°C) puede encontrarse en el mercado por precios muy competitivos, por menos de 10 euros [107]. Su implementación mediante el uso, por ejemplo, de una placa Arduino o de un microcontrolador resulta bastante simple. Se caracteriza por presentar un estándar de comunicación serial bidireccional I2C (Inter-Integrated Circuit), permitiendo la transferencia de datos entre el microcontrolador y el sensor a través únicamente de dos cables, con un voltaje de operación de entre 3.3 y 5 V. En la Figura 5.47 se muestra el módulo de placa de este sensor. [108]

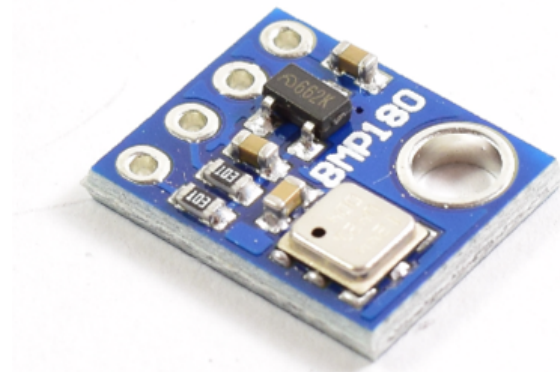


Figura 5.47: MMódulo de placa del Sensor de presión barométrica Digital BMP180. [108]

■ Cámaras

Pese a que ya se ha tratado una gran variedad de sensores, no se podría hablar de los principales sensores utilizados por los drones en vuelo sin realizar una especial mención a las cámaras. Éstas suelen incorporarse en la amplia mayoría de los drones que se comercializan en la actualidad, tanto de menor como de mayor tamaño, y constituyen actualmente una funcionalidad básica de estas aeronaves, ya

sea para usos recreativos como profesionales (transporte de mercancías, fotografía y videografía profesional, vigilancia, inspecciones, mapeo, etc.).

Existe una amplia variedad de cámaras, dependiendo su elección de factores como la precisión, la aplicación a la que se vaya a destinar el dron o el tamaño. Los principales elementos que influyen en la elección de la cámara son:

1. **Resolución de las imágenes.** Viene definido por los megapíxeles de las imágenes que captan las cámaras.
2. **Sensor de imagen.** Está integrado en las cámaras de los drones. Captura la información óptica, convirtiéndola en datos digitales que posteriormente serán tratados para producir las imágenes.
3. **Rango dinámico.** Un amplio rango dinámico permite tomar imágenes de mejor calidad, pues posibilita la captación de imágenes con mayores contrastes entre las sombras y las zonas con mayor brillo.
4. **Capacidad de video.** Es importante para aplicaciones concretas como la vigilancia. La calidad del video viene influenciada por su resolución (4K, 2.7K, FHD, HDR), así como los fotogramas por segundo (fps) que es capaz de captar.
5. **Transferencia en tiempo real.** Se consigue mediante tecnologías de transmisión digital inalámbricas, como el WiFi.

Si se comparan los drones que se utilizaron para ilustrar las diversas categorías que distingue la legislación, se puede apreciar que las características de las cámaras varían en función de su tamaño y aplicación. Además, algunos de ellos incluyen más de una cámara para incrementar las posibilidades de captación de imágenes del usuario. En la Tabla 11 y la Tabla 12 se recogen para los ejemplos de drones ya tratados el número de cámaras que incorporan y la resolución de sus imágenes.

		Nº cámaras	Nombres de las cámaras	Campo de visión	MegaPíxeles	Sistema de visión
DJI Mini 3	C0	1	-	-	48	Sistema de visión inferior
DJI Air 3	C1	2	Cámara angular	82°	48	Sistema de visión omnidireccional binocular, complementado con un sensor de infrarrojos en la parte inferior de la aeronave
			Cámara telecámara media	35°	48	
DJI Mavic 3 Pro	C2	3	Cámara Hasselblad	84°	CMOS 4/3; píxeles efectivos: 20 MP	Sistema de visión omnidireccional binocular, complementado con un sensor de infrarrojos en la parte inferior de la aeronave
			Telecámara media	35°	CMOS de 1/1.3 pulgadas; píxeles efectivos: 48 MP	
			Telecámara	15°	CMOS de 1/2 pulgada; píxeles efectivos: 12 MP	

Tabla 11: Principales características de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C0, C1 y C2. [31] [109] [110]

PHANTOM 4 RTK	C3	1	-	Delantero/ Trasero: 60° (horizontal), ±27° (vertical) Inferior: 70° (delantero y trasero), 50° (lateral)	20	Sistema de visión delantera/trasera/inferior, complementado con un sensor de infrarrojos en la parte inferior de la aeronave
DJI Matrice 300 RTK Zenmuse H20	C4	2	Zoom Camera		20 MP 1/1.7" CMOS Sensor	Sistema de visión frontal/trasero/izquierdo/derecho: 0.7-40 m Superior/inferior: 0.6-30 m, complementado con un sensor de infrarrojos en la parte inferior de la aeronave
			Wide Camera		12 MP 1/2.3" CMOS Sensor	

Tabla 12: Principales características de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C3 y C4. [111] [112]

Se observa a partir de la tabla anterior que el modelo de la categoría superior (DJI Matrice 300, categoría C4) puede incorporar una cámara multifuncional denominada DJI Zenmuse H20 para mejorar sus funcionalidades. Además, otros modelos de menor tamaño como el DJI Air 3 o el DJI Mavic 3 Pro incorporan varios tipos de cámara (el DJI Mavic 3 Pro llega a incorporar hasta tres). Este último pertenece a la categoría C2, que suele caracterizarse por drones dedicados a fotografía y videografía. A continuación, se presenta en la imagen un ejemplo de la diferente calidad de cada una de sus cámaras.

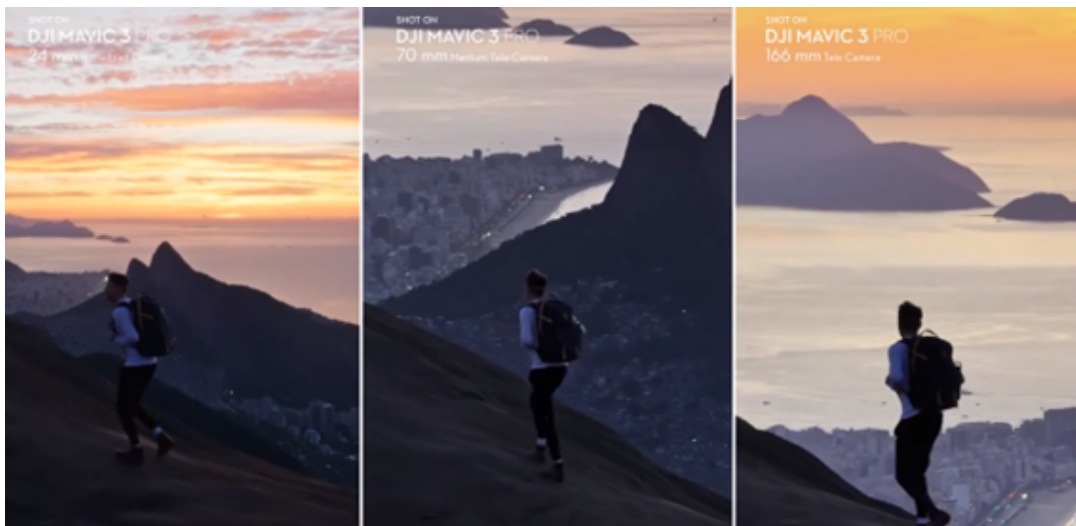


Figura 5.48: Imágenes captadas con cada una de las cámaras del DJI Mavic 3 Pro. De izquierda a derecha: 1. Cámara Hasselblad (con buena calidad y ciencia del color). 2. Telecámara 166 mm (de mayor resolución, permite hasta 7 aumentos). 3. Telecamara intermedia 70 mm (con zoom óptico de 3 aumentos). [26]

Todas ellas presentan características de calidad y resolución de video con diferentes especificaciones (4K, 5.1K, DCI 4K, FHD) y estándares de compresión de archivos de video (H.264/H.265). En la ?? y la ?? se recopila esta información.

		Nº cámaras	Nombres cámaras	Resolución de vídeo
DJI Mini 3	C0	1	-	4K: 3840×2160 a 24/25/30 fps 2.7K: 2720×1530 a 24/25/30/48/50/60 fps FHD: 1920×1080 a 24/25/30/48/50/60 fps HDR: La grabación con tasa de fotogramas de 24/25/30 fps permite generar imágenes en HDR.
DJI Air 3	C1	2	Camara angular	H.264/H.265 4K: 3840×2160 a 24/25/30/48/50/60/100* fps FHD: 1920×1080 a 24/25/30/48/50/60/100*/200* fps Grabación vertical en 2.7K: 1512×2688 a 24/25/30/48/50/60 fps Grabación vertical en FHD: 1080×1920 a 24/25/30/48/50/60 fps
			Camara telecámara media	H.264/H.265 4K: 3840×2160 a 24/25/30/48/50/60/100* fps FHD: 1920×1080 a 24/25/30/48/50/60/100*/200* fps Grabación vertical en 2.7K: 1512×2688 a 24/25/30/48/50/60 fps Grabación vertical en FHD: 1080×1920 a 24/25/30/48/50/60 fps

Tabla 13: Principales especificaciones sobre la resolución de video de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C0 y C1. [31] [109]

DJI Mavic 3 Pro	C2	3	Cámara Hasselblad	Apple ProRes 422 HQ/422/422 LT 5.1K: 5120×2700 a 24/25/30/48/50 fps DCI 4K: 4096×2160 a 24/25/30/48/50/60/120* fps 4K: 3840×2160 a 24/25/30/48/50/60/120* fps H.264/H.265 5.1K: 5120×2700 a 24/25/30/48/50 fps DCI 4K: 4096×2160 a 24/25/30/48/50/60/120* fps 4K: 3840×2160 a 24/25/30/48/50/60/120* fps FHD: 1920×1080 a 24/25/30/48/50/60/120*/200* fps
			Telecámara media	Apple ProRes 422 HQ/422/422 LT 4K: 3840×2160 a 24/25/30/48/50/60 fps H.264/H.265 4K: 3840×2160 a 24/25/30/48/50/60 fps FHD: 1920×1080 a 24/25/30/48/50/60 fps
			Telecámara	Apple ProRes 422 HQ/422/422 LT 4K: 3840×2160 a 24/25/30/48/50/60 fps H.264/H.265 4K: 3840×2160 a 24/25/30/50/60 fps FHD: 1920×1080 a 24/25/30/50/60 fps
PHANTOM 4 RTK	C3	1	-	H.264, 4K: 3840×2160 30p
DJI Matrice 300 RTK Zenmuse H20	C4	2	Zoom Camera	Video Resolution: 4K(3840 × 2160 píxeles)/30fps
			Wide Camera	Video Resolution: 4K(3840 × 2160 píxeles)/30fps

Tabla 14: Principales características de las cámaras de algunos drones DJI representativos de cada categoría. Categorías C3 y C4. [110] [111] [112]

5.4.2. Sistemas de detección de UAS en zonas restringidas del espacio aéreo

Hasta ahora han sido tratadas las principales normativas a las que queda sujeto un operador de UAS y cuyo conocimiento resulta necesario en la planificación y diseño de los vuelos con UAS. Sin embargo, puede ocurrir que los operadores, ya sea por desconocimiento, por error o de manera intencionada, acabe invadiendo zonas del espacio aéreo que no están reservadas para el vuelo de este tipo de aeronaves.

Ejemplo de ello sería la entrada de UAS en zonas pertenecientes al espacio aéreo controlado sin autorización o sin estar bajo los supuestos permitidos, pudiendo potencialmente constituir un peligro para la seguridad aérea, o su presencia en zonas DPR (zonas peligrosas, prohibidas o restringidas), que forman parte del espacio aéreo no controlado.

El sector en el que la detección de los drones encuentra una gran aplicación es en las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, en el combate de actividades ilícitas y delitos,

aunque también existen cada vez más empresas y particulares que demandan este tipo de servicios al verse en aumento en los últimos años el número de incursiones de aeronaves no tripuladas a zonas del espacio aéreo restringido, así como el número de actividades ilegales asociadas a éstas. [113]

Mediante un sistema de detección de drones no solo es posible ser consciente de su presencia, sino también obtener, en algunos casos, cierta información relativa al dron que realiza la operación, así como de las características del vuelo que está realizando.

Los sistemas de detección de drones se pueden agrupar en varios grupos en función de la tecnología empleada y los principios físicos en que ésta se basa.

- **Análisis de radiofrecuencia.** Este tipo de análisis es muy utilizado en sistemas de detección porque una de las formas de comunicación más común entre los drones y las estaciones en tierra se realiza mediante el uso de radiofrecuencia, utilizando frecuencias específicas para la comunicación de drones. A través de este tipo de comunicación es posible transmitir diferentes tipos de datos como los comandos de control, datos de telemetría, video, etc.

Cada vez son más los drones que no se comunican únicamente con las estaciones de control remoto, sino que lo hacen también con otros drones cercanos, también mediante señales de radiofrecuencia.

Todas estas señales pueden ser interceptadas también por los sistemas de detección de radiofrecuencia, por lo que también serían capaces de acceder a algunos de esos datos que se transmiten entre la aeronave y la estación en tierra u otros drones. [114]

A continuación, en la Tabla 15, se especifican las principales ventajas e inconvenientes de esta tecnología: [115]

Ventajas	Inconvenientes
- Identificación y localización de drones y operadores, además de detección.	- Alcance y capacidad de detección influenciados por la orografía u otros obstáculos (alcance máximo de unas decenas de km).
- Determinación precisa de posición de dron y controlador.	- No son capaces de detectar vuelos autónomos (sin estar pilotados en remoto).
- Detección sin necesidad de capacidad visual (diurna y nocturna).	- Posibles fallos en las funciones de localización y seguimiento de los drones.
- Relativa facilidad de implementación.	- Posibles interferencias con otras señales, que pueden ser enviadas incluso por el dron de forma deliberada.
- Amplio rango de detección	- Capacidad de evasión de estos sistemas por parte de los drones mediante la encriptación de señales.
- Caracterización del dron al poder identificar la frecuencia de transmisión y características de modulación.	
- Capacidad de seguimiento de los drones. Posibilidad de determinar sus trayectorias.	

Tabla 15: Ventajas e inconvenientes del uso de radiofrecuencia en sistemas de detección de drones. [115]

Es importante destacar que existen sistemas, conocidos como “antidrones” que también se basan en señales de radiofrecuencia. Los sistemas antidrones tienen como objetivo la eliminación del espacio aéreo de drones que realizan operaciones no autorizadas o ilegales, con el fin de garantizar la seguridad del espacio aéreo.



Figura 5.49: MSistema de detección de drones por radiofrecuencia. [116]

Uno de los principales tipos de sistemas antidrones son los de tipo pistola que, lanzando señales de radiofrecuencia se consigue inhibir las señales que le llegan al RPAS desde la estación de control, enviando comandos por radiofrecuencia para lograr que descendan verticalmente de manera segura. Como contrapartida, el alcance de estas pistolas está restringido a unos metros, lo que limita su eficacia.



Figura 5.50: Posible situación en la que se emplea un sistema antidron tipo pistola para inhibir las señales que recibe el dron. [117]

Radares para drones. Pese a que existen otro tipo de radares que normalmente se centran en captar aeronaves más grandes tripuladas, hay otro tipo de radares que también emplean sistemas de radar Doppler pulsante para detectar aeronaves más pequeñas. Este sistema se basa en la emisión de pulsos de ondas electromagnéticas que acaban impactando en los drones que se desea detectar. Al rebotar con un objeto

en movimiento, se produce un cambio en la frecuencia de estas ondas que se mide y permite, basándose en el efecto Doppler, relacionar el cambio en la frecuencia con la velocidad que tiene el objeto detectado. También existe otra clase de radares como el radar de onda continua o el radar de modulación de frecuencia, útiles también para la detección de UAS. Las principales características de este tipo de radares para drones se recogen en la Tabla 16.

Ventajas	Inconvenientes
- Largo alcance, más allá de la línea de visión.	- Alcance y capacidad de detección influenciados por la orografía u otros obstáculos.
- Precisión en la detección de posiciones.	- Interferencias con otro tipo de objetos que no son drones.
- Posibilidad de detección de drones autónomos (que no establecen comunicación remota con la estación de control).	- Influencia negativa por condiciones climatológicas adversas (lluvia, granizo, etc.).
- Detección sin necesidad de capacidad visual (diurna y nocturna).	- Dificultades para detectar drones muy pequeños.
	- Dificultades para detectar drones a muy bajas altitudes.

Tabla 16: Ventajas e inconvenientes del uso radares como sistemas de detección de drones, como el radar Doppler pulsante. [114]

Estos radares suelen tener un alcance del orden de unas decenas de kilómetros. Los sistemas antidrones que basan su detección en radares, posteriormente emplean señales de radiofrecuencia para inhibir las señales que le llegan al dron y así forzar su aterrizaje.



Figura 5.51: Sistema radar para la detección de drones. [118]

- **Sistemas de detección visual y térmica.** Constituyen una alternativa más en la detección de drones. La detección visual computarizada se lleva a cabo mediante cámaras que captan el movimiento de estas aeronaves durante el día. Esta técnica se puede combinar con los sistemas térmicos que son capaces de detectar firmas térmicas inusuales, emitidas por los drones. Esto se realiza mediante cámaras de visión infrarroja. Durante la noche o en condiciones de poca visibilidad desvelan su gran utilidad. Sus principales ventajas y desventajas son las siguientes:

Ventajas	Inconvenientes
- Información detallada del tamaño y forma del dron detectado.	- Alcance limitado por la línea de vista para los sistemas de detección por visión.
- Posibilidad de detección de drones autónomos.	- Alcance y capacidad de detección influenciados por la orografía u otros obstáculos.
- Detección también durante la noche mediante cámaras infrarrojas.	- Influencia negativa por condiciones climatológicas adversas (niebla, lluvia, granizo, etc.).
	- Falsas alarmas por detección de objetos que no son drones.

Tabla 17: Ventajas e inconvenientes del uso de sistemas de detección visual o térmica.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la tabla anterior, se puede afirmar que, si bien es cierto que los sistemas de detección visual y térmica constituyen una manera efectiva de obtener información sobre drones que sobrevuelan zonas cercanas, también resultan una solución algo menos práctica si se pretende únicamente detectar la presencia de drones, pues habría soluciones menos costosas y que implicarían una menor movilización de recursos y de uso de datos como la detección por sistemas de radiofrecuencia.

- **Sistemas de detección de señales WiFi o Bluetooth.** Los RPAS utilizan protocolos de comunicación mediante redes inalámbricas. Estas redes suelen ser WiFi o Bluetooth y suelen ser bastante fiables.

Normalmente es la red WiFi la que se encarga de la comunicación del RPAS con la estación de control del piloto en remoto, pudiendo también transmitir datos a esta estación como por ejemplo imágenes o vídeo a tiempo real. Por su parte, el Bluetooth se emplea en la conexión del dron con aparatos periféricos.

Es posible aplicar este tipo de redes en los protocolos de comunicación entre varios

drones, usándose la red WiFi para la transmisión de datos entre ellos y el Bluetooth para establecer la comunicación de corto alcance entre los UAS. [119]

El proceso mediante el cual los sistemas de detección de drones funcionan es el escaneo del espectro electromagnético, encontrando así las señales WiFi o Bluetooth que hayan emitido estos drones, pudiendo determinar la ubicación de éstos, así como la dirección MAC única del dron.

Ventajas	Inconvenientes
- Es posible obtener información adicional como la dirección MAC, no únicamente sirven para la detección.	- Alcance limitado a distancias cortas.
- Detección sin necesidad de capacidad visual (diurna y nocturna).	- Alcance y capacidad de detección influenciados por la orografía u otros obstáculos.
- Una gran cantidad de drones emplean estas señales.	- No son capaces de detectar vuelos autónomos que no empleen este tipo de señales
- Es posible detectar los patrones de vuelo que sigue el dron.	- Posibles interferencias con otras señales Wifi y Bluetooth que no sean drones.
	- Influencia negativa por condiciones climatológicas adversas (lluvia, granizo, etc.).
	- Capacidad de evasión de estos sistemas por parte de los drones mediante la encriptación de señales.

Tabla 18: Ventajas e inconvenientes del uso de sistemas de detección de drones basados en redes Wifi y/o Bluetooth.

Se puede apreciar a partir del análisis anterior que los sistemas de detección basados en este tipo de redes, si bien constituyen una herramienta útil por la amplia cantidad de drones que se comunican mediante Wifi o Bluetooth, sí presentan ciertos inconvenientes que hacen que esta detección no sea siempre del todo fiable. Resultaría beneficioso compatibilizar esta tecnología con otras como las examinadas con anterioridad para aumentar la fiabilidad en la detección de los drones.

Sistemas de detección acústicos. Estos sistemas se sirven de micrófonos para determinar si un dron se encuentra cerca de la zona de detección mediante el ruido que éstos generan. Si se emplean varios de estos sistemas a la vez, se podrá lograr la triangulación de su posición aproximada.

Ventajas	Inconvenientes
- Bajo coste en comparación con otros sistemas de detección.	- Alcance limitado, normalmente hasta un máximo de 500 m.
- Facilidad de implementación.	- Escasa fiabilidad en entornos muy ruidosos o de contaminación acústica.
- Detección sin necesidad de capacidad visual (diurna y nocturna).	- Imprecisión en la determinación de la posición si no se cuenta con varios micrófonos.
- Relativa facilidad de implementación.	- Alcance y capacidad de detección influenciados por la orografía u otros obstáculos.
- Capaces de detectar tanto vuelos tripulados remotamente como autónomos.	- Falsas alarmas por detección de objetos que no son drones.
	- Influencia negativa por condiciones climatológicas adversas (lluvia, granizo, etc.).
	- No es posible conocer información adicional acerca del dron que se haya detectado.

Tabla 19: Ventajas e inconvenientes del uso de sistemas acústicos en detección de drones.

Comparado el funcionamiento de los principales tipos de sistemas de detección de drones, se hace evidente que existen algunas alternativas más simples como la detección acústica o la detección por visión con una implementación más simple, y otras más complejas que también pueden resultar de mayor coste. Aun así, todas ellas presentan tanto fortalezas como debilidades. Es por esto que muchas empresas en este mercado recomiendan hacer uso de sistemas denominados “multicapa”, es decir, combinar varios de los métodos de detección aludidos anteriormente. De esta manera, un software que se alimente de datos provenientes de diversas tecnologías de detección podrá analizar información más compleja y variada y, mediante el análisis y la comparación de esos datos, será posible obtener resultados de mayor exactitud y precisión. [115]



Figura 5.52: Sistema de Detección de vehículos aéreos no tripulados AUDS (Detect Track Identifier Counter Drone) utilizado por el Ministerio de Defensa, combinando varias técnicas de detección. [120]

5.4.3. Implicaciones de la toma de datos sin consentimiento y derecho a la intimidad

El derecho a la intimidad viene consagrado en la Constitución Española, en concreto en su artículo 18:

“1. Se garantiza el derecho al honor, a la intimidad personal y familiar y a la propia imagen.

2. El domicilio es inviolable. Ninguna entrada o registro podrá hacerse en él sin consentimiento del titular o resolución judicial, salvo en caso de flagrante delito.

3. Se garantiza el secreto de las comunicaciones y, en especial, de las postales, telegráficas y telefónicas, salvo resolución judicial.

4. La ley limitará el uso de la informática para garantizar el honor y la intimidad personal y familiar de los ciudadanos y el pleno ejercicio de sus derechos.”

Se trata de un precepto que se engloba dentro de la Sección 1^a (De los derechos fundamentales y de las libertades públicas) del Capítulo Segundo (Derechos y libertades), del Título I (De los derechos y deberes fundamentales). Por tanto, se configura como un Derecho fundamental de especial protección, al que la propia Constitución le confiere garantías extraordinarias que van desde la vinculación de todos los poderes públicos en el respeto a su contenido esencial (art. 53.1 CE⁹⁴), a su tutela por medio de los Tribunales

⁹⁴Art. 53 CE: “1. Los derechos y libertades reconocidos en el Capítulo segundo del presente Título vinculan a todos los poderes públicos. Sólo por ley, que en todo caso deberá respetar su contenido esencial, podrá regularse el ejercicio de tales derechos y libertades, que se tutelarán de acuerdo con lo previsto en el artículo 161, 1, a). 2. Cualquier ciudadano podrá recabar la tutela de las libertades y derechos

ordinarios por vías preferentes y en último término ante el Tribunal Constitucional (art. 53.2 CE y art. 161.1 a⁹⁵) en lo que se refiere al recurso de inconstitucionalidad.

En relación con la materia que nos ocupa, la intimidad personal y familiar, así como la inviolabilidad del domicilio son claves para delimitar el alcance y los límites del uso de UAS, pues el desarrollo de la técnica permite la obtención de imágenes y sonidos a través del uso de drones no tripulados, mediante el empleo de sensores, que pueden entrar en colisión con tales derechos constitucionalmente protegidos. Es aquí donde la labor del legislador y de los tribunales es indispensable para asegurar que ambos puedan convivir pacíficamente.

La Ley Orgánica 1/1982, de 5 de mayo, de protección civil del derecho al honor, a la intimidad personal y familiar y a la propia imagen, tutela y desarrolla estos derechos. En su artículo 7 relaciona una serie de actividades que se definen como “intromisiones ilegítimas”:

Artículo séptimo

“Tendrán la consideración de intromisiones ilegítimas en el ámbito de protección delimitado por el artículo segundo de esta Ley:

Uno. El emplazamiento en cualquier lugar de aparatos de escucha, de filmación, de dispositivos ópticos o de cualquier otro medio apto para grabar o reproducir la vida íntima de las personas.

Dos. La utilización de aparatos de escucha, dispositivos ópticos, o de cualquier otro medio para el conocimiento de la vida íntima de las personas o de manifestaciones o cartas privadas no destinadas a quien haga uso de tales medios, así como su grabación, registro o reproducción.

Tres. La divulgación de hechos relativos a la vida privada de una persona o familia que afecten a su reputación y buen nombre, así como la revelación o publicación del contenido de cartas, memorias u otros escritos personales de carácter íntimo.

Cuatro. La revelación de datos privados de una persona o familia conocidos a través de la actividad profesional u oficial de quien los revela.

reconocidos en el artículo 14 y la Sección primera del Capítulo segundo ante los Tribunales ordinarios por un procedimiento basado en los principios de preferencia y sumariedad y, en su caso, a través del recurso de amparo ante el Tribunal Constitucional. Este último recurso será aplicable a la objeción de conciencia reconocida en el artículo 30.”

⁹⁵Art. 161 CE: “1. El Tribunal Constitucional tiene jurisdicción en todo el territorio español y es competente para conocer: a) Del recurso de inconstitucionalidad contra leyes y disposiciones normativas con fuerza de ley. La declaración de inconstitucionalidad de una norma jurídica con rango de ley, interpretada por la jurisprudencia, afectará a ésta, si bien la sentencia o sentencias recaídas no perderán el valor de cosa juzgada.”

Cinco. La captación, reproducción o publicación por fotografía, filme, o cualquier otro procedimiento, de la imagen de una persona en lugares o momentos de su vida privada o fuera de ellos, salvo los casos previstos en el artículo octavo, dos.

Seis. La utilización del nombre, de la voz o de la imagen de una persona para fines publicitarios, comerciales o de naturaleza análoga.

Siete. La divulgación de expresiones o hechos concernientes a una persona cuando la difame o la haga desmerecer en la consideración ajena.”⁹⁶

Los puntos Dos y Cinco afectan más directamente a los usuarios de UAS, al referirse al uso y captación de datos a través de tecnología utilizada en aeronaves no tripuladas que se entienden como una intromisión en el derecho a la intimidad de las personas.

No obstante, se han previsto algunos supuestos en que las intromisiones antes enumeradas, se consideran “legítimas”:

Artículo octavo

“Uno. No se reputará, con carácter general, intromisiones ilegítimas las actuaciones autorizadas o acordadas por la Autoridad competente de acuerdo con la ley, ni cuando predomine un interés histórico, científico o cultural relevante.

Dos. En particular, el derecho a la propia imagen no impedirá:

a) Su captación, reproducción o publicación por cualquier medio cuando se trate de personas que ejerzan un cargo público o una profesión de notoriedad o proyección pública y la imagen se capte durante un acto público o en lugares abiertos al público.

b) La utilización de la caricatura de dichas personas, de acuerdo con el uso social.

c) La información gráfica sobre un suceso o acaecimiento público cuando la imagen de una persona determinada aparezca como meramente accesorio.

Las excepciones contempladas en los párrafos a) y b) no serán de aplicación respecto de las autoridades o personas que desempeñen funciones que por su naturaleza necesiten el anonimato de la persona que las ejerza.”⁹⁷

Como seguidamente se tratará, en el ámbito de los UAS, la captación de imágenes o sonidos en lugares abiertos al público y/o con autorización judicial, quedarían fuera de aquellas conductas consideradas “ilegítimas”, al entender el legislador que la afectación al derecho a la intimidad es muy reducida o que cuenta con un permiso concedido por el Juez que justifica la intromisión.

⁹⁶Art. 7 Ley Orgánica 1/1982, de 5 de mayo, de protección civil del derecho al honor, a la intimidad personal y familiar y a la propia imagen.

⁹⁷Art. 8 Ley Orgánica 1/1982, de 5 de mayo, de protección civil del derecho al honor, a la intimidad personal y familiar y a la propia imagen.

Por lo que respecta a la inviolabilidad del domicilio (art. 18.2 CE), representa un aspecto más del derecho a la intimidad personal y familiar, al entenderse el domicilio como aquel espacio en el que vive el individuo y ejerce su libertad más íntima⁹⁸. Y se reconoce tanto en favor de personas físicas (viviendas, moradas, etc.) como (más limitadamente) en favor de personas jurídicas (establecimiento mercantil, local abierto al público, despacho profesional, oficina, etc.). Dicha inviolabilidad se encuentra protegida de intromisiones por terceros. Así, el propio Código Penal recoge en su Capítulo II (Del allanamiento de morada, domicilio de personas jurídicas y establecimientos abiertos al público) del Título X (Delitos contra la intimidad, el derecho a la propia imagen y la inviolabilidad del domicilio) delitos que prevén penas de prisión que van desde los seis meses a dos años en supuestos de allanamiento.

La propia Constitución, en relación con el principio de interdicción de la arbitrariedad de los poderes públicos del art. 9 de la CE y con la vinculación del derecho a la intimidad a todos los poderes públicos (art. 53.1 CE), establece límites para el Estado en el ejercicio de su función de policía. Se pretende proteger a los ciudadanos frente a extralimitaciones que se pudieran producir por parte de los poderes estatales. Así, el segundo inciso del apartado segundo del art. 18 CE dispone que “Ninguna entrada o registro podrá hacerse en él sin consentimiento del titular o resolución judicial, salvo en caso de flagrante delito.” Se ponen barreras a las fuerzas públicas del orden en la investigación de delitos cuando es necesario acceder a un domicilio y practicar registros en los mismos.

El desarrollo e investigación en el campo de los drones permite a los cuerpos policiales disponer de medios adicionales eficientes para la investigación de indicios y que comprenden la captación de imágenes y sonidos, seguimiento, radiografías del terreno, control de multitudes, etc. Cuando estas actividades se limitan a espacios públicos se entiende que el derecho a la intimidad no se ve afectado y la utilización de UAS por parte de la Policía Judicial se encuentra justificada. Así, las imágenes y sonidos captados por medio de los sensores incorporados a ellos tendrán valor de prueba en juicio. Los artículos 588 quater a y 588 quinquies a) de la Ley de Enjuiciamiento Criminal se refieren a estos supuestos cuando disponen que:

“Artículo 588 quater a: 1. Podrá autorizarse la colocación y utilización de dispositivos electrónicos que permitan la captación y grabación de las comunicaciones orales directas que se mantengan por el investigado, en la vía pública o en otro espacio abierto, en su domicilio o en cualesquiera otros lugares cerrados.

Los dispositivos de escucha y grabación podrán ser colocados tanto en el exterior como en el interior del domicilio o lugar cerrado.

⁹⁸STC 22/1984, de 17 de febrero de 1984, FJ 5 : “el domicilio inviolable es un espacio en el cual el individuo vive sin estar sujeto necesariamente a los usos y convenciones sociales y ejerce su libertad más íntima”.

2. *En el supuesto en que fuera necesaria la entrada en el domicilio o en alguno de los espacios destinados al ejercicio de la privacidad, la resolución habilitante habrá de extender su motivación a la procedencia del acceso a dichos lugares.*

3. *La escucha y grabación de las conversaciones privadas se podrá complementar con la obtención de imágenes cuando expresamente lo autorice la resolución judicial que la acuerde.”*

“Artículo 588 quinquies a: 1. La Policía Judicial podrá obtener y grabar por cualquier medio técnico imágenes de la persona investigada cuando se encuentre en un lugar o espacio público, si ello fuera necesario para facilitar su identificación, para localizar los instrumentos o efectos del delito u obtener datos relevantes para el esclarecimiento de los hechos.

2. La medida podrá ser llevada a cabo aun cuando afecte a personas diferentes del investigado, siempre que de otro modo se reduzca de forma relevante la utilidad de la vigilancia o existan indicios fundados de la relación de dichas personas con el investigado y los hechos objeto de la investigación.”

No obstante, en el momento en que se traspasan los límites de una propiedad privada que constituya domicilio, el artículo 18.2 de la Constitución Española despliega toda su eficacia y no permite que se utilicen tales dispositivos o medios técnicos para la obtención de imágenes o para captar o grabar conversaciones sin autorización judicial (siempre que no exista consentimiento del titular de la vivienda o exista flagrancia delictiva⁹⁹). En caso contrario, cualquier indicio que se obtenga por la Policía Judicial por estos medios no tendrá valor de prueba en juicio.

Viene al caso la Sentencia de la Sala de lo Penal del Tribunal Supremo 1079/2016, que se refiere a la obtención de pruebas a través de los agentes de la Policía Judicial por medio de prismáticos dirigidos al interior de una vivienda donde se encontraban los investigados, refiriéndose al uso de drones cuando dice que *“la protección constitucional frente a la incursión en un domicilio debe abarcar, ahora más que nunca, tanto la entrada física del intruso como la intromisión virtual. La revolución tecnológica ofrece sofisticados instrumentos de intrusión que obligan a una interpretación funcional del art. 18.2 de la CE. La existencia de drones, cuya tripulación a distancia permite una ilimitada capacidad de intromisión en recintos domiciliarios abiertos es sólo uno de los múltiples ejemplos imaginables. Pero incluso para el caso en que se entendiera que los supuestos de falta de*

⁹⁹STC 22/1984, de 17 de Febrero. FJ 3: “En el texto constitucional, la norma de interdicción de entrada y de registro sólo admite unas excepciones muy determinadas: el consentimiento del titular, que según el texto del precepto no necesita ser expreso, la existencia de una resolución judicial que la autorice y la producción de un delito flagrante, caso en el cual los perseguidores pueden continuar la persecución del domicilio de la persona afectada.”

*presencia física por parte de los agentes en el domicilio investigado deben ser protegidos conforme al concepto general de intimidad que ofrece el art. 18.1 de la CE, lo cierto es que en el presente caso no consta la existencia de ningún fin constitucionalmente legítimo que, por razones de urgencia, permitiera sacrificar la intimidad del sospechoso.”*¹⁰⁰ En consecuencia, se absuelve a los acusados al no haber solicitado los agentes autorización judicial para la obtención de imágenes (en este supuesto por medio de prismáticos). Sin esa autorización la prueba del delito fue declarada nula, pues se entendió que se había producido una intromisión ilegítima en la intimidad de los investigados al afectar a la inviolabilidad del domicilio.

En cualquier caso, la legislación y la jurisprudencia no son capaces de alcanzar el desarrollo de la técnica que ya ha incorporado a los RPA escáneres, cámaras térmicas, de visión nocturna o diurna, sistemas de detección, videovigilancia, análisis topográfico, . . . que implican la obtención o tratamiento de datos de carácter personal y que pueden afectar al derecho a la intimidad.

El artículo 26 del Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto¹⁰¹, impone como obligación del operador de sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto el cumplimiento de la normativa de protección de datos, que en la actualidad viene dada por la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales [34], y la LO 1/1982, de 5 de mayo, de protección civil del derecho al honor, a la intimidad personal y familiar y a la propia imagen, sus normas de desarrollo y normativa concordante.

La propia Agencia española de protección de datos ha publicado una guía: “Drones y Protección de Datos”¹⁰² para tratar de poner orden en una materia un tanto confusa, distinguiendo dos categorías en función de si las actividades de los drones incluyen o no tratamiento de datos personales. En el primer grupo se encontrarían todas aquellas actividades relacionadas con operaciones de videovigilancia y utilización de sensores para la captación de sonido e imagen a estos fines; y en el segundo se hallarían, por ejemplo, operaciones de inspección como las topográficas que no tienen como fin una recopilación de datos personales. No obstante, en este último grupo es posible que inesperadamente se tomen datos de carácter personal que requieran un tratamiento posterior a fin de cumplir

¹⁰⁰STS nº 329/2016 (Sala Segunda, Sección 1ª), de 20 de abril de 2016 (recurso: 1789/2015). FJ 2.

¹⁰¹Real 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.

¹⁰²Agencia Española de Protección de Datos, “Drones y Protección de Datos”, Agencia Española de Protección de Datos.

con lo dispuesto en la LO 3/2018, de 5 de diciembre [34]. En estos casos, se deberán adoptar medidas como la utilización de drones en lugares o en franjas horarias que minimicen la exposición de terceros, uso de técnicas de difuminado o edición, almacenamiento de la información estrictamente necesaria o útil, prescindiendo de aquella que resulte innecesaria y contenga datos relativos a personas que permitan su identificación, . . .

Cuando la obtención de datos de carácter personal es no sólo inevitable sino el objetivo principal de la utilización del RPA, lo que es, de hecho, el supuesto más frecuente (téngase en cuenta que la práctica totalidad de los drones a la venta incluyen como mínimo sistemas de cámara), es de aplicación la LO de Protección de datos y recae en el operador la responsabilidad del tratamiento y procesamiento de los datos.

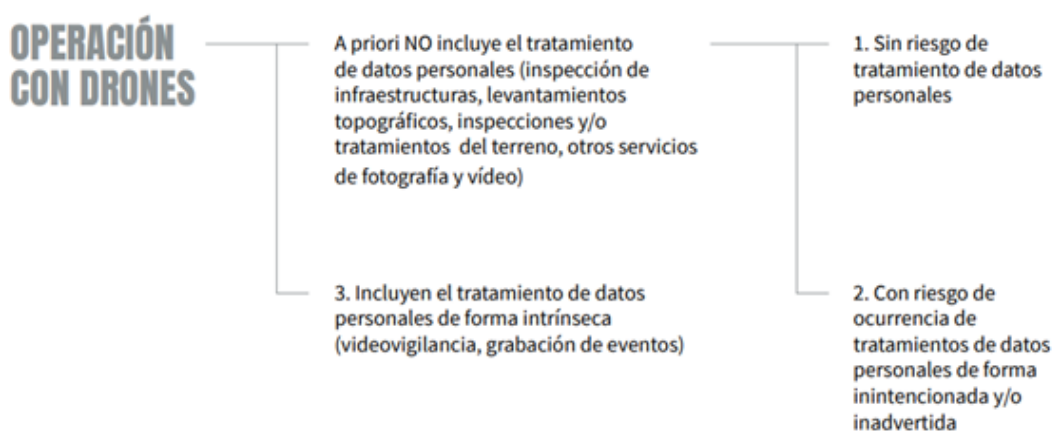


Figura 5.53: Esquema Tratamiento de datos en función de las operaciones a realizar con drones. ¹⁰³

Un ejemplo de la implicación de la toma de datos personales, como se ha comentado en el estudio del marco regulatorio, se encuentra en la obligación impuesta a los sistemas de aeronaves no tripuladas de categoría abierta de figurar en un registro público si incluyen sensores capaces de captar datos personales, con independencia de su masa¹⁰⁴ y siempre que no tengan la consideración de juguetes conforme a la Directiva 2009/48/CE [121]. De esta manera, se pretende el seguimiento y control de este tipo de UAS cuando existe un riesgo de vulneración del derecho a la intimidad y la privacidad de los usuarios¹⁰⁵. Esto unido a la obligación a los operadores de garantizar el cumplimiento la normativa de protección de datos y del derecho a la intimidad¹⁰⁶ ya comentada, pretende lograr un doble efecto: identificar el sistema implicado y exigir responsabilidades a su operador, que está obligado a velar por que no se vulnere el derecho a la intimidad al utilizar tales sistemas y a adoptar las medidas necesarias para que ello no ocurra.

¹⁰⁴En la categoría específica existe la obligación de registro en todo caso. Art. 14 Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947.

¹⁰⁵Punto (13) Reglamento (UE) 2019/947.

¹⁰⁶Art. 26 f) RD 1036/2017.

Todo ello, aunque pueda parecer una obviedad o no se le conceda la importancia que realmente tiene, puede conllevar, para los operadores de sistemas de aeronaves no tripuladas, infracciones de naturaleza administrativa o incluso de naturaleza penal. En este orden, se han previsto delitos específicos por lesión del derecho fundamental a la intimidad en los arts. 197 y ss del Código Penal recogidos en el Capítulo I del Título X (Delitos contra la intimidad, el derecho a la propia imagen y la inviolabilidad del domicilio), por medio del descubrimiento o revelación de secretos, incluyéndose entre los hechos delictivos la utilización de “artificios técnicos de escucha, transmisión, grabación o reproducción del sonido o de la imagen, o de cualquier otra señal de comunicación”¹⁰⁷, (aplicable al uso de drones) con el objetivo de descubrir secretos o vulnerar la intimidad de otro sin su consentimiento.

En consecuencia, la utilización de aeronaves no tripuladas en ámbitos privados está muy limitada. De hecho, del estudio de las normas internacionales, europeas y españolas resulta que los requerimientos y restricciones se vuelven más estrictos a medida que las operaciones con UAS se acercan a zonas pobladas o urbanas, aglomeraciones de personas, edificios o reuniones de personas al aire libre (p.ej.: necesidad de certificado de aeronavegabilidad). Y ello es así, principalmente por factores de seguridad de la operación, pero también de forma colateral ayuda a proteger el derecho a la intimidad de los particulares y, principalmente, controlar a los operadores de esas zonas.

En resumen, no se vulnerará el derecho a la intimidad si se cuenta con el consentimiento de los afectados (p.ej. relación contractual, como campaña publicitaria o reportaje), con una resolución que autorice la intromisión en dicho derecho, en supuestos de flagrante delito o si, habiéndose obtenido de forma inintencionada o inadvertida, los datos son objeto de un proceso de tratamiento que incluya operaciones de “anonimización”. En cualquier otro supuesto el art. 18 de la Constitución deberá prevalecer y deben preverse mecanismos de protección de este derecho fundamental.

Espionaje y utilización de UAS como arma de guerra

En 2023, Estados Unidos ha derribado con un F-22 lo que a criterio del Departamento de Estado constituía un dron espía con instrumentos diseñados para la interceptación de comunicaciones y geolocalización. Pekín por el contrario mantiene su naturaleza de globo meteorológico destinado única y exclusivamente a fines de investigación. Por parte de El Pentágono se señala que no es un episodio aislado, sino que han existido precedentes que ponen en juego la seguridad y soberanía del Estado presuntamente espionado [122] [123]. Sea como fuere, lo cierto es que las aeronaves no tripuladas ofrecen amplias posibilidades de uso tanto lícitas como ilícitas. En este segundo grupo destacan por sus implicaciones todas aquellas modalidades de espionaje por cuanto afectan a la seguridad nacional. Los Estados tienen a su disposición tecnología que puede utilizarse en el espionaje de naciones

¹⁰⁷Art. 197 Ley Orgánica 10/1995, de 23 de noviembre, del Código Penal.

potencialmente enemigas, ya sea de modo preventivo, defensivo o como arma de guerra. La existencia de drones prácticamente imperceptibles con sensores y dispositivos de una sofisticación cercana a la satelital (debido a la altitud a la que operan), puede aportar información de inteligencia de los países espiados acerca de la posición de infraestructuras críticas, de defensa, recursos naturales, posicionamiento de armamento nuclear, mapeo del terreno o incluso la localización de personas o interceptación de comunicaciones.

En este contexto, se puede plantear la duda de si es correcto adoptar medidas de derribo del UAV en supuestos como el ocurrido a principios de 2023 en Estados Unidos. La respuesta nos la proporciona el propio Convenio sobre Aviación Civil Internacional cuyo artículo 1 refiere que *“todo Estado tiene soberanía plena y exclusiva en el espacio aéreo situado sobre su territorio”*¹⁰⁸, entendiéndose como territorio de un Estado, conforme al art. 2 del mismo Convenio *“las áreas terrestres y las aguas territoriales adyacentes a ella que se encuentran bajo la soberanía, dominio, protección o mandato de dicho Estado”*¹⁰⁹. Por tanto, al margen de consideraciones diplomáticas, es lícito que un Estado defienda su soberanía en su territorio (incluido su espacio aéreo) frente a otro Estado ante posibles actos que atenten contra la misma, en particular si no se ha solicitado permiso por el Estado titular de la aeronave no tripulada tal y como prescribe el art. 8 del Convenio de Chicago de 1944.

Por otro lado, no solo pueden equiparse los UAS con dispositivos de captación de datos, sino que, desde el primer momento, las aeronaves no tripuladas han estado en el punto de mira de la industria armamentística. Habilitar drones con misiles o explosivos ha revolucionado la industria de la guerra y la forma en que se desarrollan los conflictos, permitiendo llevar a cabo operaciones a distancia sin peligro real para el usuario del dron y afectar a objetivos con escaso margen de error. Recientemente, grupos militares presuntamente vinculados con el régimen iraní han protagonizado un ataque a una base militar estadounidense cerca de la frontera con Siria. El resultado ha sido tres soldados norteamericanos muertos y numerosos heridos. [124] Su regulación se despliega en el terreno del Derecho Internacional, y viene delimitado por los sucesivos Convenios de Ginebra, la normativa de Naciones Unidas sobre ciertas armas convencionales y en especial el Derecho Internacional Humanitario. Ejemplo de este tipo de UAS lo encontramos en el dron estadounidense Predator B [125], también utilizado por el Estado español.

Es crucial, poner el énfasis en que las aplicaciones de los UAS son abundantes y están al servicio de los fines que se pretenden conseguir, que no necesariamente son lograr el desarrollo socioeconómico y técnico de las naciones, sino que pueden perseguir desestabilizar a otros Estados, cuando no atacarlos directamente, intervenir en conflictos armados o mantener una influencia internacional a costa del espionaje de otros países.

¹⁰⁸Art. 1 Convenio sobre Aviación Civil Internacional.

¹⁰⁹Art. 2 Convenio sobre Aviación Civil Internacional.

6. Desarrollo tecnológico

6.1. Futuras aplicaciones en UAS

En la última década el empleo de UAS ha aumentado exponencialmente, generalizándose y extendiéndose cada vez más, tanto entre un mayor número de usuarios como para un abanico creciente de aplicaciones. En la actualidad, si bien se siguen utilizando para las actividades tradicionales para las que se comenzaron a popularizar (fotografía, vuelos recreativos, . . .), han aparecido nuevas aplicaciones gracias al desarrollo tecnológico y, con ellas, nuevos modelos de negocio y nichos de mercado todavía por explorar.

El ejemplo más paradigmático de estas novedosas aplicaciones es el transporte de mercancías. A este respecto, se suelen distinguir entre modelos de carga ligera (capaces de transportar payloads de hasta 5 kg) y los de carga pesada, llegando incluso a superar los 18 kg de peso, si bien es cierto que todavía existen modelos en desarrollo, además de proyectos de intentar desarrollar modelos de UAS capaces de transportar cada vez mayores cargas de pago, sin que ello vaya en detrimento de la eficiencia y las actuaciones de la aeronave. [126]

Un parámetro que resulta determinante en esta aplicación es la autonomía de los drones, puesto que acabará determinando bajo qué condiciones los vuelos con transporte de mercancías podrán realizarse. A día de hoy, los principales modelos son capaces de ejecutar vuelos autónomos de 30 minutos, aunque algunos de ellos pueden alcanzar autonomías de hasta 1 hora. Todo esto dependerá de las características de las baterías que se incorporan al dron, así como de la potencia que precisan estas aeronaves durante el vuelo, aumentando la potencia requerida a mayores MTOM (lo que ocurre si se necesita transportar cargas de pago más pesadas). Por otro lado, habrá que tener presente que en función del MTOM será preciso un marcado de clase diferente (p.ej. C3 y C4 <25 kg), con los requerimientos legales ya estudiados y las limitaciones que llevan aparejados.

Las principales ventajas de la implantación de esta tecnología para el transporte de mercancías se exponen a continuación: [127]

1. Reducción del tiempo de espera, lo que repercute en una mejora en la satisfacción por parte del consumidor
2. Potencial reducción de los costes logísticos de las empresas.
3. Posibilidad de entrega de mercancías en zonas de difícil acceso o muy alejadas de los núcleos urbanos. Con ello también podría verse incrementada la demanda.
4. Posible reducción de riesgos y de equivocaciones en las entregas al reducir el factor humano en el proceso de transporte y entrega de la mercancía.

5. Mayor facilidad de monitorizar los procesos de transporte de las mercancías, lo que puede implicar una mejora en la optimización de éstos.
6. Menor contaminación que la que puede producirse en los procesos tradicionales de transporte, por ejemplo, por carreteras.
7. Descongestión de vías urbanas.

Todas estas ventajas citadas no son solo teóricas, sino que han sido puestas en práctica en entornos controlados, como se ha podido comprobar en programas piloto para la entrega de paquetes de empresas distribuidoras muy relevantes del sector que ya llevan algunos años participando en la investigación e implementación de este tipo de soluciones mediante UAS, como ocurre con UPS, Amazon (experimentando con entregas a domicilio desde 2016) o DHL.[128]

Ejemplos de drones que se pueden encontrar en el mercado para el transporte de paquetes son el dron profesional “Cargo Robot” [129] de la empresa ICO Drones, ubicada en Cádiz, o el Dron industrial [130] de la empresa canadiense “Daganfly Drones”. Ambos son drones de ala rotatoria impulsados por 6 y 8 motores respectivamente. En la Tabla 20 se aprecian sus principales especificaciones:

	CARGO ROBOT	Dron industrial
Empresa	ICO Drones	Draganfly Drones
Aplicaciones	Transporte de mercancías	<ul style="list-style-type: none"> - Entrega de cargas pesada - Cartografía - Vigilancia - Búsqueda y rescate
Ala	Rotatoria	Rotatoria
Nº rotores	6	8
Propulsión	Motores eléctricos	Motores eléctricos
Carga máx. [kg]	7,5	30,4
Autonomía [min]	22	55

Tabla 20: Principales especificaciones de dos ejemplos de drones para el transporte de mercancías. “Cargo Robot” de ICO Drones y el Dron industrial de “Daganfly Drones”. [129] [130]

Se puede observar que, si bien el “Cargo Robot” de ICO Drones tiene una carga de pago máxima que entra dentro de los valores comunes (7,5 kg), el Dron industrial de “Daganfly Drones” supera con creces estos valores, llegando a poder transportar cargas de pago de hasta 30 kg. Incorpora dos rotores más que el “Cargo Robot” y presenta una mayor autonomía.



Figura 6.1: Dos ejemplos de drones para el transporte de mercancías. “Cargo Robot” de ICO Drones y el Dron industrial de “Daganfly Drones”. [129] [130]

Pese a que en España es más difícil encontrar ejemplos de implementación de estos modelos, sí existen ya precedentes de la denominada “distribución urbana de mercancías” con resultados positivos, sobre todo en países asiáticos. Se han aplicado sistemas de drones con taquillas en zonas con elevada densidad poblacional, como en Japón, que implantó un programa piloto en el año 2023 (y prevé importantes avances para el año 2024). La ciudad de Shenzhen (China) también participa de este proceso, puesto que en su economía destaca el papel de empresas dedicadas a la entrega de comida a domicilio, como Mizuan que, desde el año 2022, ha llegado a gestionar de 100.000 envíos mediante este método. [128] [131]

En nuestro país, no obstante, existen algunas iniciativas y se están realizando pruebas para que, en el medio plazo, el transporte de mercancías por estos medios acabe materializándose. Uno de los ejemplos más sonados últimamente es el Proyecto Ale-Hop (Aero Logística de Emergencias para Hospitales y Organismos Públicos), llevado a cabo por el Hospital público Cantoblanco, adscrito al Hospital de la Paz, en el que también colabora el Gobierno autonómico de la Comunidad de Madrid y cuenta con financiación estatal, además de empresas privadas. Este proyecto se enfoca en un tipo particular de transporte de mercancías, que es el transporte de medicamentos entre hospitales, en este caso en kits de hasta 2.5 kg. Este proyecto llevó a cabo su primer vuelo en el verano de 2023, culminando así exitosamente con la primera fase del mismo. Posteriores fases del proyecto se están centrando en la implementación de vuelos sin visión directa en la que los drones depositen en taquillas los medicamentos (como ocurre con el modelo asiático), así como en la reducción del factor humano en todo el proceso, ventaja que se ha comentado anteriormente. También se ha planteado la posibilidad de transporte de órganos entre hospitales por estas vías en desarrollos futuros del proyecto, con el objetivo de acortar plazos dada la urgencia en el proceso de extracción, transporte y práctica de las intervenciones quirúrgicas. [131]



Figura 6.2: Primer vuelo del proyecto Ale-Hop, enfocado en el transporte de medicamentos entre Hospitales de la Comunidad de Madrid. Verano de 2023. [131]

No solamente se están realizando proyectos de desarrollo para el transporte de mercancías en ciudades muy pobladas de nuestro país. También existen proyectos como el de “Archytas” de “Pirineos Drone” [132] en el Val d’Aran en el que la empresa pasó de emplear drones para el control del ganado hace 3 años a ser actualmente pioneros en el transporte mediante drones de paquetes de hasta 5 kg en zonas de difícil acceso, lo que constituye otra de las ventajas del uso de drones que emplean esta aplicación.

Por otro lado, constituye una aplicación relativamente novedosa el transporte de personas. Este tipo de aplicación ha experimentado un desarrollo notable sobre todo durante la década de 2010 cuando el desarrollo tecnológico tanto en materiales (y su uso en otros campos como la aeronáutica o la Fórmula 1) como en baterías o sistemas de control ya estaba suficientemente asentado como para poder plantearse aplicarlo en el transporte de personas, desarrollando drones con despegue vertical (eVTOL) de gran tamaño en comparación con los drones producidos en los años anteriores. Resulta imprescindible también en este ámbito el peso de las aeronaves, pues generalmente en la actualidad se están desarrollando prototipos de drones capaces de transportar hasta 100 kg de payload y autonomías de hasta 50 km, como es el caso del modelo EHang 184 de la empresa China EHang, encargada del diseño de drones para viajes urbanos. [133]

Otros ejemplos de empresas que diseñan y fabrican modelos de drones para el transporte de personas son la alemana Volocopter [134] (que diseña vehículos eléctricos con múltiples rotores, como el modelo con su mismo nombre, que incorpora 18), o la estadounidense Joby Aviation [135] (con el diseño del Joby Aircraft, aeronave eVTOL capaz de modificar la orientación de los rotores cuando se propulsa en vuelo en comparación con las fases de despegue y aterrizaje).



Figura 6.3: Aeronave Volocopter, con 18 rotores, creada por la startup Volocopter con sede en Alemania. [136]

Además, otra aplicación que ya existía como ciencia consolidada, pero que ha sufrido un importante desarrollo es la topografía. Se trata de la ciencia que se encarga de caracterizar las propiedades en tres dimensiones de la superficie terrestre mediante el cálculo de distancias y elevaciones del terreno. [137] La sofisticación de la técnica en esta disciplina condujo a la topografía digital, que se basa en la caracterización del terreno mediante puntos georreferenciados gracias a mediciones de elevada precisión con sistemas GNSS y fotos satelitales. [138] Los drones son de gran ayuda para la topografía digital por ser capaces de realizar levantamientos topográficos, es decir, procesos en los que los drones dotados con sensores específicos toman datos del terreno al sobrevolarlo, pudiendo así caracterizarlo de manera precisa y eficiente. Un ejemplo de sensor usado en estos levantamientos es el LIDAR, tratado previamente.

Finalmente, también ha experimentado un importante desarrollo en estos últimos años el uso de drones para aplicaciones militares, como ya se ha introducido en el punto anterior. Esto no se debe únicamente al desarrollo tecnológico que ha posibilitado dotar a los drones con mejores sensores y armas, sino que también y en gran medida al panorama bélico que se vive actualmente, plasmado en conflictos como los de Rusia-Ucrania o Israel en la Franja de Gaza.

A continuación, se enumeran las principales actividades que son capaces de realizar los drones en el ámbito militar:

1. **Reconocimiento y vigilancia.** Una importante aplicación de estas aeronaves es el espionaje de bases y objetivos enemigos antes del ataque. Por ello, el desarrollo tecnológico se enfrenta al desafío de su detección, ya sea por sensores infrarrojos o por su huella de ruido. En este sentido, también resulta crucial dotar a estas aeronaves con sensores lo suficientemente sofisticados para captar la mayor información posible, a poder ser, a grandes rangos de distancia, para no ser detectados por el enemigo.

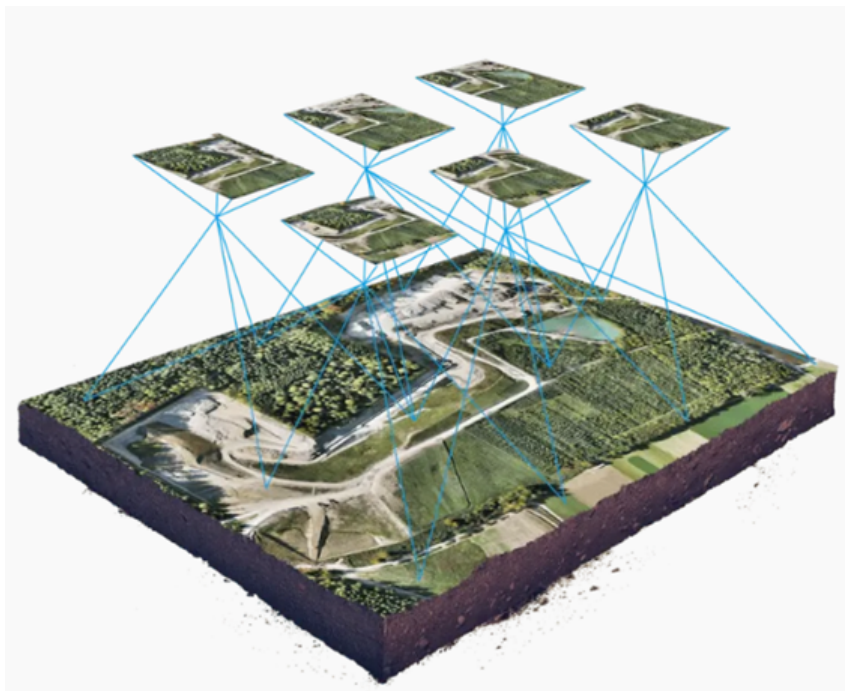


Figura 6.4: Caracterización del terreno en levantamientos topográficos mediante drones. [139]

2. **Transporte.** Puede ser también de gran utilidad la presencia de drones para trasladar suministros, medicamentos o incluso armas a soldados que se encuentran en el frente y, en ocasiones, en zonas de difícil acceso. Así, su interceptación por parte del enemigo se tornaría más compleja.
3. **Ataque.** Constituye una de las tareas más relevantes llevadas a cabo por los drones en los conflictos bélicos. Para atacar desde el aire, es importante dotar a estas aeronaves con misiles y otro tipo de armas, además de diseñarlas para que puedan transportar grandes cargas de pago. También es conveniente hacerlas versátiles para que puedan llevar diferentes tipos de armas en función de los requerimientos del ataque, además de capaces de operar en diversas condiciones climáticas y con elevados alcances.

Además, cabe destacar la importancia de disponer de una línea de comunicación segura entre el RPAS y la estación en tierra para que la comunicación no quede interceptada y comprometida.

Históricamente, el uso de drones en el ámbito armamentístico no viene precisamente de tiempos recientes a diferencia de otras aplicaciones como el transporte de mercancías cuyo desarrollo es más moderno. Y es que EEUU ya los comenzó a utilizar en la década de los 50, cuando todavía no se había popularizado para usos civiles. Ofrecían como principal

ventaja que no ponían en riesgo la vida de militares que pilotaran estas aeronaves. No obstante, el desarrollo tecnológico permite que en la actualidad se puedan diseñar y fabricar aeronaves no solamente más eficientes sino también con mayores capacidades tanto ofensivas como de captación de datos. Es por esto que, en el panorama actual, se vienen utilizando masivamente los drones en los conflictos bélicos, lo cual constituye una característica diferenciadora significativa de los conflictos actuales respecto a los vividos en el siglo pasado.

En la actualidad, existen RPAS militares de importante tamaño, (que superan incluso los 2000 kg), pero también se hace uso de otros mucho más pequeños, idóneos para vigilancia y control de ciertas zonas de batalla. Una de sus importantes ventajas es su bajo coste de fabricación, pudiendo atacar con el cargamento explosivo que incorpore como carga de pago a blancos, tanto a infantería como a artillería enemiga. Gracias a ellos es posible llevar a cabo ataques aéreos a carros de combate de elevado coste para el enemigo, que no están preparados para repeler este tipo de incursiones. [140]

En lo que respecta a la invasión rusa de Ucrania, se ha podido atestiguar un elevado incremento en la fabricación de estas aeronaves, y multitud de países han apoyado a la nación invadida con la aportación de modelos de drones militares. Por su parte, Rusia también ha empleado a menudo los drones como arma militar en esta contienda y, si bien ha tenido que recurrir a veces a modelos iraníes para alcanzar sus objetivos, asegura tener capacidades de producción suficientes para la demanda que requiere el conflicto. [141]

Lo cierto es que este cambio de paradigma en las batallas campales es una realidad y las potencias armamentísticas globales han comprendido el papel que este tipo de drones posee para decantar los conflictos bélicos.

Ejemplos de drones militares de gran tamaño utilizados por diferentes países son:

- **Predator B (Estados Unidos)**

Dron militar de creación estadounidense, de la empresa General Atomics Aeronautical Systems, utilizado en misiones de reconocimiento, vigilancia y ataque. Está propulsado por un motor turbohélice TPE331-10 y permite un buen rendimiento a bajas altitudes. [142]

Cuatro de estos drones fueron adquiridos por el Gobierno español por 216 millones de euros en 2015 y fueron equipados con misiles conocidos como Hellfire, que presentan una gran precisión de impacto. [142]



Figura 6.5: Dron militar Predator B. [143]

- **CH-4 (China)** Dron producido por la empresa china estatal Aerospace Science and Technology Corporation. Ha sido creado para misiones que han de desarrollarse a elevadas altitudes (hasta 5.000 metros), lo que resulta especialmente ventajoso para evitar ser detectado por las defensas enemigas. Además, posee una gran autonomía (30 a 40 horas), pudiendo estar equipado con una carga de pago de hasta 345 kg. [144]



Figura 6.6: Dron militar CH-4. [144]

- **Hermes 900 (Israel)** Se trata de un dron de fabricación israelí concebido para el desarrollo de misiones a altitudes medias, con una autonomía que supera las 30 horas y un MTOW de 970 kg, permitiendo cargas de pago de hasta 300 kg. Se caracteriza igualmente por incorporar sensores ópticos de última generación para la realización de misiones de vigilancia. Es el caballo de batalla de la fuerza aérea israelí y ha sido utilizado ampliamente por el Ejército ucraniano para repeler los ataques rusos causados en su territorio. [145]



Figura 6.7: Dron militar Hermes 900. [145]

- **Shahed 136 (Irán)**

Es un dron iraní, de tamaño pequeño y ligero, aunque menos sofisticado que los anteriores drones analizados y con tecnologías menos vanguardistas. Esto limita su utilización a objetivos estáticos, no móviles. El motor es ruidoso, lo que restringe su uso en labores de vigilancia e inteligencia. No obstante, presenta una autonomía de hasta 2.500 km. Dada las relaciones entre el régimen iraní y Moscú, ha sido adquirido y empleado por Rusia en la guerra contra Ucrania. [145]



Figura 6.8: Dron miliar Shahed 136. [146]

6.2. IA y evoluciones legislativas

El 21 de abril de 2021 la Comisión Europea presentó la Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas armonizadas en materia

de inteligencia artificial (Ley de Inteligencia Artificial) y se modifican determinados actos legislativos de la Unión. [147]

En su Exposición de Motivos se establecía lo siguiente *“La inteligencia artificial (IA) es un conjunto de tecnologías de rápida evolución que puede generar un amplio abanico de beneficios económicos y sociales en todos los sectores y las actividades sociales. Mediante la mejora de la predicción, la optimización de las operaciones y de la asignación de los recursos y la personalización de la prestación de servicios, la inteligencia artificial puede facilitar la consecución de resultados positivos desde el punto de vista social y medioambiental, así como proporcionar ventajas competitivas esenciales a las empresas y la economía europea. Esto es especialmente necesario en sectores de gran impacto como el cambio climático, el medio ambiente y la salud, el sector público, las finanzas, la movilidad, los asuntos internos y la agricultura. No obstante, los mismos elementos y técnicas que potencian los beneficios socioeconómicos de la IA también pueden dar lugar a nuevos riesgos o consecuencias negativas para personas concretas o la sociedad en su conjunto. En vista de la velocidad a la que cambia la tecnología y las dificultades que podrían surgir, la UE está decidida a buscar un enfoque equilibrado. Redunda en interés de la Unión preservar su liderazgo tecnológico y garantizar que los europeos puedan aprovechar nuevas tecnologías que se desarrollen y funcionen de acuerdo con los valores, los derechos fundamentales y los principios de la UE.”* [147]

Tomando como base esta propuesta, el Consejo y el Parlamento Europeo en diciembre de 2023 llegaron a un acuerdo para la redacción de un Reglamento pionero que está llamado a ser la primera Ley de Inteligencia Artificial en el mundo.

Una de las principales novedades que se pretende incluir en la Ley de IA es la clasificación de la Inteligencia Artificial en función del grado de riesgo que lleva aparejado su uso, distinguiendo: riesgo inaceptable, alto riesgo, riesgo limitado y riesgo bajo o mínimo¹¹⁰. Esta clasificación es importante, pues determinará un mayor intervencionismo sobre la libre utilización de IA a medida que el nivel de riesgo aumente. Se podrá exigir el registro de sistemas de alto riesgo, certificaciones, autorizaciones para operar en el mercado comunitario, o incluso exámenes y monitorización de su implantación, así como la previsión de medidas correctivas o sancionadoras¹¹¹. En niveles de riesgo limitado, las obligaciones de los sistemas IA se verían reducidos a la transparencia, con el objeto de que los usuarios puedan conocer en todo momento que el contenido ha sido creado por Inteligencia Artificial. Cuando el riesgo se considerase mínimo, la utilización de estos sistemas no se vería limitada, mientras que, si el riesgo se enmarcara en un nivel inaceptable, las prácticas IA estarían prohibidas.

¹¹⁰Artificial intelligence act (europa.eu), pág. 4 [147]

¹¹¹Artificial intelligence act (europa.eu), pág. 5 [147]

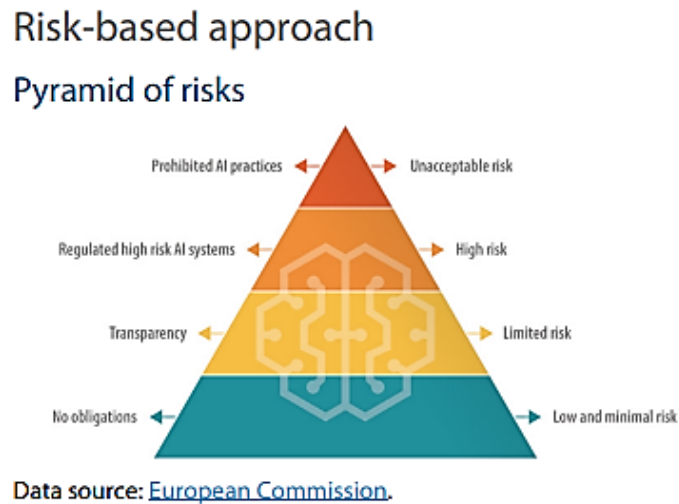


Figura 6.9: Enfoque del riesgo IA. ¹¹²

Resulta que la Inteligencia Artificial está ya afectando de manera transversal a todos los sectores y, no cabe duda de que el sector de la aviación civil no va a permanecer ajeno a este fenómeno. [148]

En materia de UAS, el paso lógico siguiente consistiría en combinar un pilotaje a distancia con mecanismos de IA que permitieran tomar decisiones más eficientes a través del análisis de la información recibida por el UAS por medio de los sensores que lleve incorporados. Resulta fácil imaginar este escenario si lo comparamos con los asistentes de conducción que incorporan los vehículos más modernos. Gracias a estos sistemas se compagina una conducción manual con correcciones de marcha, detecciones de salida del carril o limitaciones de velocidad, extrapolables a las operaciones con UAS.

Las futuras aplicaciones en UAS permitirían una detección en tiempo real de avisos meteorológicos, de avisos de ENAIRE sobre zonas temporalmente restringidas al espacio aéreo o de acceso accidental a zonas prohibidas o limitadas. También podría adoptar decisiones autónomas de modificación de la trayectoria o aterrizaje de emergencia en casos de peligro de colisión (p.ej. por aves, árboles, cableado de alta tensión...).

En definitiva, se trata de avanzar hacia un modelo híbrido de pilotaje humano-máquina, que entre dentro de los estándares de riesgo admisibles por la próxima legislación europea. Resulta más difícil pensar que en el corto o medio plazo la navegación plenamente autónoma vaya a ser la norma y se permita su integración en el espacio aéreo segregado. A la vista de los borradores legislativos de que se dispone, este escenario está aún lejos de materializarse, pues por razones de seguridad de los bienes y las personas, la sola utilización de IA en componentes o productos que afecten a la seguridad de la aviación ya se catalogaría dentro de los sistemas de alto riesgo¹¹³, con las restricciones que éstos llevan

¹¹³Artificial intelligence act (europa.eu), pág. 5 [147]

aparejados.

Finalmente, y a falta del texto definitivo que se apruebe, cabe preguntarse si este interés por regular la Inteligencia Artificial desde momentos tan tempranos de su desarrollo puede afectar a la competitividad de las empresas comunitarias en el mercado. Restringir o prohibir determinadas aplicaciones de los sistemas IA podría provocar una desventaja competitiva frente a mercados más permisivos en su regulación como Estados Unidos, China o los países en vías de desarrollo. Es comprensible el temor a lo desconocido y a las posibilidades de la Inteligencia Artificial, no obstante, la nueva Ley de IA debe tener vocación de favorecer el desarrollo de sistemas que traigan avances a la sociedad y a sus sectores productivos, entre ellos el de la aviación, y tratar de lograr un consenso internacional sobre su regulación a través de los organismos internacionales como la OACI que permitan una armonización en la materia, como la vivida en la segunda mitad del siglo XX para la aeronavegación civil.

7. Conclusiones

A tenor de todo lo expuesto, resulta claro que la industria de la aeronavegación ha encontrado una fuerte vía de expansión en el mercado de los sistemas de aeronaves no tripulados. Esto es comprensible por la variedad y transversalidad de sus aplicaciones y usos, unos ya desarrollados y generalizados (recreativo, científico, salvamento, militar y de defensa, . . .), y otros en vías de desarrollo o estudio (médico, de transporte de mercancías y pasajeros, navegación plenamente autónoma, . . .).

La consecuencia lógica de este rápido desarrollo ha sido una legislación cambiante, que ha tratado de evolucionar a la par que los avances técnicos han diversificado las oportunidades de uso de los drones. En algunos casos, la legislación ha logrado prever e incluso adelantarse a los cambios en el sector (inteligencia artificial), en otros, se ha demostrado insuficiente o excesivamente restrictiva (transporte de bienes y personas). Y es que no se trata de una materia sencilla sobre la que establecer regulaciones o directrices claras y efectivas: su alcance es internacional (lo que explica la participación de organizaciones internacionales o supranacionales como la OACI o EASA), pero también afecta e incide de forma doméstica en la seguridad (nacional y de particulares) y en los derechos de los ciudadanos (intimidación). Por otra parte, sus usos, el objetivo del vuelo a realizar, el riesgo aparejado y el entorno (espacio aéreo controlado o no, zonas no permitidas, RMZ, TMZ, FPMZ, . . .) afectan al marco operativo y a la normativa aplicable. Aquí entra en juego la labor pedagógica de Agencias y Entes Públicos como ENAIRE que hacen descender al terreno de la práctica, la abundante legislación en la materia, y guían a los usuarios particulares y empresas en el proceso de utilización de UAS.

El perfeccionamiento de la geoconsciencia de estos sistemas, a través de sensores cada vez más precisos, y su combinación con novedosos sistemas de inteligencia artificial, van a suponer una revolución en la forma en que se entienden las operaciones con UAS. Si estas mejoras redundan en un incremento de la seguridad (sistemas de evasión de colisiones, “Sense and Avoid”), el papel del piloto a distancia será cada vez más residual, dándose mayor autonomía a las operaciones BVLOS y reduciendo el contacto con la estación de pilotaje remoto o de alcance directo de emisión por radio. Las operaciones prediseñadas o la adopción de decisiones autónomas en vuelo por el dron estarían a la orden del día. También es factible una progresiva apertura de zonas actualmente vetadas a los vuelos de UAS como las zonas urbanas o aglomeraciones de personas o la, menos probable, integración de las aeronaves plenamente autónomas en el espacio aéreo no segregado. No obstante, en el corto y medio plazo queda aún mucho camino por recorrer. Los riesgos que asume un sector como el de la aeronavegación obligan a estudiar detenidamente los adelantos y las nuevas aplicaciones que van surgiendo, tanto en el software del dron como en su hardware (sensorización). El desarrollo de la técnica no debe estar reñido con la cautela y la prudencia y debe alcanzarse un equilibrio que permita a los UAS alcanzar

todo su potencial sin sacrificar derechos ni precauciones.

Por último, se aconseja un esfuerzo conjunto a nivel internacional para marcar nuevas directrices que superen a las ya obsoletas. Como ya está sucediendo a nivel de la OACI, se deben promover foros de debate y propuestas legislativas, con la intención de alcanzar una armonización de las normativas de los diferentes países, y así evitar mercados y espacios aéreos que operen a diferentes velocidades. Esta armonización permitiría sentar las bases para aprovechar las oportunidades que ofrecen los UAS, buscando, eso sí, un compromiso para su utilización con fines lícitos, limitándose los usos armamentísticos y de espionaje entre países.

8. Presupuesto

Finalmente, por lo que respecta al análisis presupuestario, dado que se trata de un Trabajo de Fin de Máster de carácter teórico, los gastos que se hayan podido devengar derivan de los costes asociados a la redacción del trabajo y de los recursos empleados.

De esta manera, si se toma como base las retribuciones del profesorado funcionario en base a la Ley de Presupuestos para el Ejercicio 2023 (Aplicado incremento 0,5 % adicional Acuerdo Marco)¹¹⁴ para un profesor Catedrático de Universidad con dedicación a tiempo completo (3.452,53 € total mensual) y se obtiene el coste unitario por hora aplicado en la asistencia, guía y corrección del trabajo del alumno, que se estiman en 30 horas aproximadamente, se alcanza un total de 21,58 €/h x 30 horas= 647,40 €.

Por lo que respecta al coste de investigación asociado al alumno, se ha tomado como referencia el salario total mensual que percibe un ayudante conforme a la tabla de retribuciones antedicha¹¹⁵, esto es, 1.704,94 €, lo que da un total de 10,65 €/hora. Se estiman empleadas unas 280 horas en labores de investigación y redacción del trabajo en los 10 meses de duración del mismo, lo que equivale a un coste total del alumno de 2.982,00 €.

Así, los costes por sueldos y salarios ascienden a 3.629,40 €.

Para obtener el coste en electricidad, se parte del coste €/kWh medio para el año 2023: 0.0871 €/kWh como precio de referencia, debido a las fluctuaciones diarias del precio por kW/hora. Si se calculan empleadas 280 horas, y se utiliza un ordenador con una potencia de 65 W, que es igual a 0,065 kW, el coste por suministro eléctrico del ordenador equivale a 1,585 euros.

El ordenador utilizado ya se encuentra totalmente amortizado por lo que no procede su inclusión en el presupuesto, más allá del consumo eléctrico ya contemplado.

	Nº horas	Salarios (€/h)	TOTAL (€)
Tutora	30	21,58	647,4
Estudiante	280	10,65	2.982,00

Tabla 21: Cómputo de horas dedicadas al proyecto y estimación de la remuneración correspondiente.

¹¹⁴Retribuciones profesorado funcionario en base a la ley de presupuestos para el ejercicio 2023, pág. 1 [149]

¹¹⁵Retribuciones profesorado funcionario en base a la ley de presupuestos para el ejercicio 2023, pág. 1 [149]

	Nº horas	Coste (€/kWh)	kW	TOTAL (€)
Electricidad	280	0,0871	0,065	1,585

Tabla 22: Estimación del coste derivado del gasto eléctrico durante el proyecto.

TOTAL = 3.630,98 euros.

9. Referencias

- [1] SKY brary, “Icao regions,” Disponible en: <https://skybrary.aero/articles/icao-regions>, Última consulta: 10-10-2023.
- [2] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, “Espacio aéreo. descripción,” Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/espacio-aereo/descripcion>, Última consulta: 10-10-2023.
- [3] SKY Brary, “Flight information region (fir),” Disponible en: <https://skybrary.aero/articles/flight-information-region-fir>, Última consulta: 09-03-2024.
- [4] ControladoresAereos.org, “¿cómo se divide y organiza el espacio aéreo? fir, ctr, tma, atz, cta,” Disponible en: <http://www.controladoresaereos.org/2016/05/25/como-se-divide-y-organiza-el-espacio-aereo-firctrmaatzcta-video/>, Última consulta: 12-10-2023.
- [5] European Union, “Eur-lex. document 32012r0923,” Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2012/923/oj/spa, Última consulta: 12-10-2023.
- [6] Mnisterio de Trasportes, movilidad y agenda urbana. ENAIRE, “Aip española,” Disponible en: <https://aip.enaire.es/AIP/>, Última consulta: 15-1-2024.
- [7] ENAIRE, “Aplicación insignia,” Disponible en: https://insignia.enaire.es/?_gl=1*12w9deo*_ga*MTA0MzI4MjA4My4xNzAwMjQ0OTI2*_ga_6BWPFHBF33*MTcwMDI0NDkyNi4xLjEuMTcwMDI0NTY1OS42MC4wLjA.&_ga=2.18571513.1781584399.1700244926-1043282083.1700244926, Última consulta: 31-12-2023.
- [8] BOE, “Reglamento de ejecución (ue) nº 923/2012 de la comisión, de 26 de septiembre de 2012,” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2012-81859>, Última consulta: 12-12-2023.
- [9] OACI, “Circular oaci 328-an/190. sistemas de aeronaves no tripuladas (uas),” Disponible en: https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_es.pdf, Última consulta: 13-12-2023.
- [10] SKY brary, “Flight information service,” Disponible en: <https://skybrary.aero/articles/flight-information-services>, Última consulta: 10-10-2023.
- [11] SKY Brary, “Classification of airspace,” Disponible en: <https://skybrary.aero/articles/classification-airspace>, Última consulta: 09-03-2024.
- [12] Ministerio de transportes y movilidad sostenible, “Zonas de espacio aéreo para el uso obligatorio de radio, transpondedor o plan de vuelo,” Disponible

- en: <https://sede.seguridadaerea.gob.es/sede-aesa/catalogo-de-procedimientos/zonas-de-espacio-a%C3%A9reo-para-el-uso-obligatorio-de-radio-transpondedor-o>,
Última consulta: 09-10-2023.
- [13] AESA, “Espacio aéreo. descripción,” Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/espacio-aereo/descripcion>, Última consulta: 15-10-2023.
- [14] ENARE, “Aplicación icaroxxi,” Disponible en: https://notampib.enaire.es/icaro?_gl=1*1kp7680*_ga*MTA0MzI4MjA4My4xNzAwMjQ0OTI2*_ga_6BWPFHBF33*MTcwMDI0NDkyNi4xLjEuMTcwMDI0NzEyMC42MC4wLjA.&_ga=2.85476057.1781584399.1700244926-1043282083.1700244926, Última consulta: 15-10-2023.
- [15] ENAIRE, “Aplicación enaire drones,” Disponible en: https://drones.enaire.es/?locale=es&_gl=1*6n17wh*_ga*MTA0MzI4MjA4My4xNzAwMjQ0OTI2*_ga_6BWPFHBF33*MTcwMDI0NDkyNi4xLjAuMTcwMDI0NDkyNi42MC4wLjA.&_ga=2.13681015.1781584399.1700244926-1043282083.1700244926, Última consulta: 31-12-2023.
- [16] ICAO, “Cielos seguros. futuros sostenible,” Disponible en: https://www.icao.int/about-icao/Pages/ES/member-states_ES.aspx, Última consulta: 01-10-2023.
- [17] ICAO, “Situación de España con respecto a los instrumentos de derecho aéreo internacional,” Disponible en: https://www.icao.int/secretariat/legal/Status%20of%20individual%20States/spain_es.pdf, Última consulta: 01-10-2023.
- [18] ICAO, “Icao misión y visión,” Disponible en: <https://www.icao.int/about-icao/Council/Pages/vision-and-mission.aspxg>, Última consulta: 01-10-2023.
- [19] ICAO, “Sobre la oaci,” Disponible en: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/ES/default.aspx>, Última consulta: 02-10-2023.
- [20] ICAO, “La oaci pide innovaciones para la gestión del espacio aéreo frente a los drones,” Disponible en: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/ICAO-issues-call-for-drone-airspace-management-innovations.aspx>, Última consulta: 02-10-2023.
- [21] BOE, “Reglamento delegado (ue) 2019/945 de la comisión, de 12 de marzo de 2019,” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2019-81002>, Última consulta: 02-10-2023.
- [22] UE, “Reglamento de ejecución (ue) 2019/947 de la comisión,” Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2019/152/L00045-00071.pdf>, Última consulta: 03-10-2023.

-
- [23] UE , “Reglamento (ue) 2018/1139 del parlamento europeo y del consejo,” Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1139&from=EN>, Última consulta: 03-10-2023.
- [24] DJI, “Dron dji mini 3,” Disponible en: <https://www.dji.com/es/mini-3>, Última consulta: 02-03-2024.
- [25] DJI, “Dron dji air 3,” Disponible en: <https://www.dji.com/es/air-3?from=store-product-page>, Última consulta: 02-03-2024.
- [26] DJI, “Dron dji mavic 3 pro,” Disponible en: <https://www.dji.com/es/mavic-3-pro>, Última consulta: 02-03-2024.
- [27] DJI, “Dron dji phantom 4 rtk,” Disponible en: <https://enterprise.dji.com/es/phantom-4-rtk>, Última consulta: 02-03-2024.
- [28] DJI, “Dron dji matrice 300,” Disponible en: <https://enterprise.dji.com/es/matrice-300>, Última consulta: 02-03-2024.
- [29] One Air. Escuela de pilotos., “Normativa de drones en españa 2024,” Disponible en: <https://www.oneair.es/normativa-drones-espana-aesa/>, Última consulta: 03-10-2023.
- [30] AESA., “Registro y operación de uas de masa máxima al despegue (mtom) inferior a 250 gramos,” Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/Informacion%20sobre%20UAS%20de%20menos%20de%20250g.pdf>, Última consulta: 15-10-2023.
- [31] DJI, “Especificaciones dron dji mini 3,” Disponible en: <https://www.dji.com/es/mini-3/specs>, Última consulta: 02-03-2024.
- [32] DJI, “Dron dji mini 3. toca el cielo.” Disponible en: <https://www.dji.com/es/mini-3>, Última consulta: 02-03-2024.
- [33] Mundo Dron., “Especificaciones técnicas dron juguete syma x5,” Disponible en: <https://mundodrone.es/syma-x5c/>, Última consulta: 15-10-2023.
- [34] BOE, “Ley orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de protección de datos personales y garantía de los derechos digitales.” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2018-16673>, Última consulta: 14-03-2024.
- [35] BOE, “Reglamento (ce) nº 1592/2002 del parlamento europeo y del consejo,” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2002-81583>, Última consulta: 17-10-2023.
- [36] AESA, “Aesa. the agency,” Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/the-agency>, Última consulta: 17-10-2023.

- [37] BOE, “Real decreto 645/2020, de 7 de julio, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana.” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2020/BOE-A-2020-7508-consolidado.pdf>, Última consulta: 18-10-2023.
- [38] BOE, “Organigrama del ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana.” Disponible en: https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/otrosdocumentos/organigrama_2022_mayo.pdf, Última consulta: 18-10-2023.
- [39] AESA, “Resolución de la dirección de la agencia estatal de seguridad aérea por la que se aprueban escenarios estándar nacionales.” Disponible en: https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/0_20201202__resolucion_escenarios_estandar_nacionales.pdf, Última consulta: 19-10-2023.
- [40] AESA, “Aesa uas/drones.” Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/operaciones-uas-drones/operaciones-con-uas-drones---categoria-especifica>, Última consulta: 19-10-2023.
- [41] AESA, “Registro de operador de drones/uas.” Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/registro-de-operador-de-drones-uas>, Última consulta: 19-10-2023.
- [42] BOE, “Real decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia.” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2014/BOE-A-2014-7064-consolidado.pdf>, Última consulta: 19-10-2023.
- [43] BOE, “Real decreto 160/2023, de 7 de marzo, por el que se aprueba el estatuto de la entidad pública empresarial enaire, y se modifica el estatuto de la agencia estatal de seguridad aérea, aprobado por real decreto 184/2008, de 8 de febrero.” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2023/BOE-A-2023-6084-consolidado.pdf>, Última consulta: 19-10-2023.
- [44] ENAIRE, “Enaire. quiénes somos.” Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2023/BOE-A-2023-6084-consolidado.pdf>, Última consulta: 19-10-2023.
- [45] ENAIRE, “Enaire. drones.” Disponible en: <https://www.enaire.es/servicios/drones>, Última consulta: 20-10-2023.
- [46] ENAIRE, “Enaire. drones.” Disponible en: <https://drones.enaire.es/?locale=es>, Última consulta: 20-10-2023.
- [47] ElDiario.es, “Eldiario.es. tekever integra su radar gasamar en los drones ar5 y ar3,” Disponible en: <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/4201709/tekever-integra-radar-gasamar-drones-ar5-ar3>, Última consulta: 20-10-2023.

-
- [48] Bayona Salvador, Ricardo, “Trabajo final de máster en ingeniería aeronáutica “desarrollo de un simulador de centro de mando para monitorización de flotas de drones y gestión de los mismos”.” Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/175375/Bayona%20-%20Desarrollo%20de%20un%20simulador%20de%20centro%20de%20mando%20para%20monitorizacion%20de%20flotas%20de%20drones%20y%20...pdf?sequence=1&isAllowed=y>, Última consulta: 20-10-2023.
- [49] mecinca.net, “El receptor gps.” Disponible en: <http://www.mecinca.net/Presentaciones/EL%20RECEPTOR%20GPS.htm>, Última consulta: 21-10-2023.
- [50] LifeWire, “What is trilateration?.” Disponible en: <https://www.lifewire.com/trilateration-in-gps-1683341>, Última consulta: 21-10-2023.
- [51] AMS, “El gps.” Disponible en: <https://cosillasinteresantes.com/el-gps-2>, Última consulta: 23-10-2023.
- [52] Aero Cámaras, “Para qué sirven los gps en los drones y en qué situaciones se utilizan.” Disponible en: <https://cursodedrones.es/para-que-sirven-los-gps-en-los-drones-y-en-que-situaciones-se-utilizan/>, Última consulta: 23-10-2023.
- [53] Reg Austin, Ian Moir, Allan Seabridge, y Roy Langton, *Unmanned air vehicles: UAV design, development, and deployment*. John Wiley Sons, Incorporated, 2010.
- [54] TS2, “How does a drones waypoint navigation system work.” Disponible en: <https://ts2.space/en/how-does-a-drones-waypoint-navigation-system-work/>, Última consulta: 23-10-2023.
- [55] “Psr vs ssr.” Disponible en: <https://pbs.twimg.com/media/BsxcTaMIUAAXpn7.jpg>, Última consulta: 23-10-2023.
- [56] .Aviación Global, “Cómo funciona el ads-b. la tecnología que viene ya está aquí.” Disponible en: <https://www.aviacionglobal.com/articulos-tecnicos-de-aviacion/como-funciona-el-ads-b-la-tecnologia-que-viene-ya-esta-aqui/>, Última consulta: 25-10-2023.
- [57] Gianluca Chiesa Pastor, “Desarrollo de un sistema de recepcion para senales ads-b,” Disponible en: https://ricabib.cab.cnea.gov.ar/659/1/Chiesa_Pastor.pdf, Última consulta: 25-10-2023.
- [58] ICAO, “Annex 10 - aeronautical telecommunications,” Disponible en: <https://store.icao.int/en/annexes/annex-10>, Última consulta: 25-10-2023.

- [59] Radar Tutorial, “Características comparativas de radar primario y radar secundario,” Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp06.es.html>, Última consulta: 25-10-2023.
- [60] EU Drone Port, “Metodología sora,” Disponible en: <https://eudroneport.com/es/blog/metodologia-sora/>, Última consulta: 25-10-2023.
- [61] AESA, “Guía para operadores de rpas sobre procedimientos de: Habilitación y autorización,” Disponible en: https://www.seguridadaaerea.gob.es/sites/default/files/guia_proced_habilitac_autoriz_oper_rpas.pdf, Última consulta: 25-10-2023.
- [62] Aero Expo, “Tso app for drone transponder filed by uavionix,” Disponible en: <https://trends.aeroexpo.online/es/project-78387.html>, Última consulta: 26-10-2023.
- [63] uAvionix, “Tso certified mode s ads-b transponder for uas,” Disponible en: <https://uavionix.com/products/ping200x/>, Última consulta: 26-10-2023.
- [64] uAvionix, “Zpx-a aims certified micro transponder for uavs,” Disponible en: <https://uavionix.com/zpx-a/>, Última consulta: 26-10-2023.
- [65] EUROCONTROL, “Acas guide airborne collision avoidance systems,” Disponible en: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-03/eurocontrol-safety-acas-guide-4-1.pdf>, Última consulta: 26-10-2023.
- [66] Luis Rodolfo Garcia Carrillo, “Schematic of the proposed control structure: the trajectory tracking strategy relies on the implementation of a backstepping controller enhanced with disturbance compensation by means of a robust exact differentiation (red).” Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-proposed-control-structure-the-trajectory-tracking-strategy-relies-on_fig2_283105169, Última consulta: 30-10-2023.
- [67] EMBENTION, “Noticias embention,” Disponible en: <https://www.embention.com/noticias/>, Última consulta: 26-10-2023.
- [68] UTS, “Sense and avoid technology. detect and avoid systems for drones and unmanned systems,” Disponible en: [https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/sense-avoid-systems/#:~:text=Sense%20and%20Avoid%20\(SAA\)%20or,lines%2C%20birds%20and%20other%20obstacles](https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/sense-avoid-systems/#:~:text=Sense%20and%20Avoid%20(SAA)%20or,lines%2C%20birds%20and%20other%20obstacles), Última consulta: 26-10-2023.
- [69] Luis Rodolfo Garcia Carrillo, “Sense and avoid strategy.” Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Sense-and-avoid-strategy_fig1_283105169, Última consulta: 29-10-2023.
- [70] ENAIRE, “¿cómo volar drones en espacio aéreo controlado por enaire?” Disponible en: https://www.enaire.es/servicios/drones/lo_necesario_para_volar_tu_dron/volar_espacio_aereo_controlado_enaire, Última consulta: 30-10-2023.

-
- [71] Enaire, “Guía de cumplimentación de planes de vuelo (mensajes fpl) en icaro xxi para operaciones uas,” Disponible en: <https://notampib.enaire.es/icaro/>, Última consulta: 09-03-2024.
- [72] ICAO, “Doc 9859 — safety management manual (smm),” Disponible en: <https://elibrary.icao.int/explore;searchText=doc%209859;mainSearch=1/product-details/229751;seoMode=true>, Última consulta: 02-11-2023.
- [73] Aero Cámaras, “¿qué es la metodología sora?” Disponible en: <https://cursodedrones.es/metodologia-sora-en-el-estudio-de-seguridad-de-drones/>, Última consulta: 03-11-2023.
- [74] AESA, “Estudio de seguridad para operaciones declarativas,” Disponible en: https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/apendice-f_0.pdf, Última consulta: 02-11-2023.
- [75] AESA, “Apéndice s (18/09/2018) guía sobre el contenido del estudio aeronáutico de seguridad,” Disponible en: https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/apendice-s-v1-guia-estudio-seguridad-sora_0.pdf, Última consulta: 30-11-2023.
- [76] AESA, “Geofísica y exploración,” Disponible en: [https://av3aerovisual.com/tipos-de-magnetometros-usos-y-caracteristicas/#:~:text=El%20magnet%C3%B3metro%20de%20protones%20s%C3%B3lo,total%20\(Breiner%2C1973\),](https://av3aerovisual.com/tipos-de-magnetometros-usos-y-caracteristicas/#:~:text=El%20magnet%C3%B3metro%20de%20protones%20s%C3%B3lo,total%20(Breiner%2C1973),) Última consulta: 10-11-2023.
- [77] Aliexpress, “Dron magnetómetro sensor fluxgate sensor magnético magnetómetro carga útil mínima 600g navegación uav sondeo geofísico,” Disponible en: <https://www.aliexpress.com/?spm=a2g0o.detail.logo.1.7dcb47f88U94z5>, Última consulta: 20-11-2023.
- [78] Electronic COmponents, “¿cómo funciona y qué hace el acelerómetro?” Disponible en: <https://www.aliexpress.com/?spm=a2g0o.detail.logo.1.7dcb47f88U94z5>, Última consulta: 20-11-2023.
- [79] MESUREX, “Acelerómetro de la serie dma de la empresa mesurec.” Disponible en: <https://measurex.com/catalogo/productos/acelerometros/dma-series/>, Última consulta: 25-11-2023.
- [80] GEEKNETIC, “¿qué es un giroscopio y para qué sirve?” Disponible en: <https://www.geeknetic.es/Giroscopio/que-es-y-para-que-sirve>, Última consulta: 25-11-2023.
- [81] Asoc. Pasión por volar, “Giróscopos – principios básicos,” Disponible en: <https://www.pasionporvolar.com/giroscopos-principios-basicos/>, Última consulta: 26-11-2023.

- [82] Muncdo Aeronáutico, “Sistema giroscópico,” Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=nhNg-8RSuKY>, Última consulta: 27-11-2023.
- [83] Agencia Espacial Mexicana Blog, “Sistemas de navegación inercial,” Disponible en: <https://www.gob.mx/aem/articulos/sistemas-de-navegacion-inercial-156859#:~:text=La%20navegaci%C3%B3n%20inercial%20es%20una,con%20orientaci%C3%B3n%20y%20velocidad%20conocidos>, Última consulta: 29-11-2023.
- [84] Embention, “Noticias embention,” Disponible en: <https://www.embention.com/noticias/#:~:text=La%20Unidad%20de%20Medici%C3%B3n%20Inercial,del%20veh%C3%ADculo%20a%C3%A9reo%20no%20tripulados>, Última consulta: 30-11-2023.
- [85] SBG Systems, “Ins - sistema de navegación inercial,” Disponible en: <https://www.sbg-systems.com/es/sistema-de-navegacion-inercial-ins/>, Última consulta: 30-11-2023.
- [86] Horacio Estrada Vázquez, “Mems – aplicaciones en metrología,” Disponible en: https://www.cenam.mx/dme/pdf/PRE_E-Mie-2.pdf, Última consulta: 03-12-2023.
- [87] SGB Systems, “Ellipse series,” Disponible en: <https://www.sbg-systems.com/es/productos/ellipse-series/>, Última consulta: 07-12-2023.
- [88] Maria Cristina Munuera Raga, “Filtro de kalman y sus aplicaciones,” Disponible en: <https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/127417/2/memoria.pdf>, Última consulta: 07-12-2023.
- [89] FpvMax, “Dji mavic air imu - qué es y como calibrar correctamente,” Disponible en: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=JOjFX4_wGJg, Última consulta: 07-12-2023.
- [90] Topo Servis, “Tecnología lidar: ¿cómo se aplica en servicios topográficos?” Disponible en: <https://toposervis.com/tecnologia-lidar-como-se-aplica-en-servicios-topograficos/>, Última consulta: 12-12-2023.
- [91] YellowScan, “Drone lidar: Todo lo que necesitas saber sobre lidar en uavs,” Disponible en: <https://www.yellowscan.com/es/knowledge/lidar-drone/>, Última consulta: 15-12-2023.
- [92] RPASDrones, “Metodología de trabajo para levantamiento lidar-fotogramétrico mediante uav de ala rotativa,” Disponible en: <https://rpas-drones.com/levantamiento-lidar-fotogrametrico-uav-ala-rotativa/>, Última consulta: 15-12-2023.

-
- [93] DRONICA, “¿qué es un lidar y para qué se utiliza?” Disponible en: <https://www.dronica.es/blog-de-escaneo-3d/que-es-un-lidar-y-para-que-se-utiliza/>, Última consulta: 17-12-2023.
- [94] Velodyne Lidar, “Velodyne lidar,” Disponible en: <https://velodynelidar.com/products/puck/>, Última consulta: 20-12-2023.
- [95] Velodyne LiDAR, “Hdl-32e vlp-16 interface box,” Disponible en: https://velodynelidar.com/wp-content/uploads/2019/08/63-9259-REV-C-MANUALINTERFACE-BOXHDL-32EVLP-16VLP-32_Web-S.pdf, Última consulta: 20-12-2023.
- [96] Aero Cámaras, “¿qué es el sistema lidar?” Disponible en: <https://cursodedrones.es/drones-con-lidar/>, Última consulta: 20-12-2023.
- [97] RPASDrones, “Metodología de trabajo para levantamiento lidar-fotogramétrico mediante uav de ala rotativa,” Disponible en: <https://rpas-drones.com/levantamiento-lidar-fotogrametrico-uav-ala-rotativa/>, Última consulta: 21-12-2023.
- [98] TFG: Lucía Morcillo Martíne, “Sistema de detección de obstáculos para drones basado en sensor láser,” Ph.D. dissertation, UPV, 2018.
- [99] DigiKey, “Comprender los sensores ultrasónicos,” Disponible en: <https://www.digikey.es/es/articulos/understanding-ultrasonic-sensors>, Última consulta: 23-12-2023.
- [100] Suconel, “Sensor de distancia de ultrasonido de 2cm a 450cm hcsr04,” Disponible en: <https://suconel.com/product/sensor-de-distancia-de-ultrasonido-de-2cm-a-450cm-hcsr04/>, Última consulta: 28-12-2023.
- [101] Julio Lago, “Diseño y control de un dron con evasión de obstáculos,” Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/111801/Resumen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>, universitat Politècnica de Catalunya (Octubre. 2017) Última consulta: 03-01-2024.
- [102] Prometec, “Los sensores infrarrojos,” Disponible en: <https://www.prometec.net/siguelineas-ir/>, Última consulta: 03-01-2024.
- [103] Carlos Cienfuegos, “Detección de obstáculos en drones: Guía rápida,” Disponible en: <https://dronesbaratosya.com/deteccion-de-obstaculos-en-drones-guia-rapida/>, Última consulta: 03-01-2024.
- [104] RCInnovations, “Dji fpv - módulo infrarrojo sensor obstáculos,” Disponible en: <https://rc-innovations.es/shop/dji-fpv-modulo-infrarrojo-sensor-obstaculos#attr=>, Última consulta: 03-01-2024.

- [105] Naylampmechatronics, “Tutorial sensor de presión barométrica bmp180,” Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/43_tutorial-sensor-de-presion-barometrica-bmp180.html, Última consulta: 05-01-2024.
- [106] Petrolheadgarage, “¿qué es el sensor de presión barométrica (baro)?” Disponible en: <https://petrolheadgarage.com/cursos-automocion/sensor-de-presion-barometrica-baro/>, Última consulta: 05-01-2024.
- [107] Cablematic, “Sensor electrónico de presión y temperatura bmp180 gy-68,” Disponible en: <https://cablematic.com/es/productos/sensor-electronico-de-presion-y-temperatura-bmp180-gy-68-AJ015/>, Última consulta: 06-01-2024.
- [108] Naylampmechatronics, “Sensor de presión bmp180,” Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/75-sensor-de-presion-bmp180.html>, Última consulta: 05-01-2024.
- [109] DJI, “Especificaciones dron dji air 3,” Disponible en: <https://www.dji.com/es/air-3/specs>, Última consulta: 02-03-2024.
- [110] DJI, “Especificaciones dron dji mavic 3 pro,” Disponible en: <https://www.dji.com/es/mavic-3-pro/specs>, Última consulta: 02-03-2024.
- [111] DJI, “Especificaciones dron dji phantom 4 rtk,” Disponible en: <https://enterprise.dji.com/es/phantom-4-rtk/specs>, Última consulta: 02-03-2024.
- [112] DJI, “Especificaciones dron dji matrice 300,” Disponible en: <https://enterprise.dji.com/es/matrice-300/specs>, Última consulta: 02-03-2024.
- [113] The wall Street Journal, “Drones flying near airports, infrastructure prompt u.s. action,” Disponible en: <https://www.wsj.com/articles/drones-flying-near-airports-infrastructure-prompt-u-s-action-11621533604>, Última consulta: 09-01-2024.
- [114] TS2, “Cómo funciona el sistema de radiofrecuencia de un dron,” Disponible en: <https://ts2.space/es/como-funciona-el-sistema-de-radiofrecuencia-de-un-dron/#gsc.tab=0>, Última consulta: 09-01-2024.
- [115] Aerial Armor. A drone company., “Cómo detectar drones: La guía definitiva de detección y rastreo de drones por aerial armor,” Disponible en: <https://es.aerialarmor.com/blog/how-to-detect-a-drone>, Última consulta: 09-01-2024.
- [116] Aero Expo, “Sistema de detección de drones rf x9,” Disponible en: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/aaronia-ag/product-187323-63239.html>, Última consulta: 09-01-2024.

-
- [117] Carlos Prego, “Cómo funciona el rifle anti-drones tan exitoso en ucrania y que ya utiliza la policía española,” Disponible en: <https://www.xataka.com/otros/como-funciona-rifle-anti-drones-exitoso-ucrania-que-utiliza-policia-espanola>, Última consulta: 10-01-2024.
- [118] María alexándrova. Russia Beyond., “Rusia crea un radar especial para detener los minidrones espía,” Disponible en: <https://es.rbth.com/tecnologias/88273-rusia-crea-radar-especial-detener-minidrones>, Última consulta: 12-01-2024.
- [119] TS2, “Cómo funciona el sistema de comunicación interna de un dron,” Disponible en: <https://ts2.space/es/como-funciona-el-sistema-de-comunicacion-interna-de-un-dron/#gsc.tab=0>, Última consulta: 15-01-2023.
- [120] Redacción CISDE Observatorio., “Defensa adquiere un sistema para desactivar drones.” Disponible en: <https://observatorio.cisde.es/actualidad/defensa-adquiere-un-sistema-para-desactivar-drones/>, Última consulta: 16-01-2024.
- [121] AESA, “Registro y operación de uas de masa máxima al despegue (mtom) inferior a 250 gramos.” Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/Informacion%20sobre%20UAS%20de%20menos%20de%20250g.pdf>, Última consulta: 19-01-2024.
- [122] Miguel Jiménez, “Ee uu asegura que el globo chino tenía antenas para interceptar señales de comunicaciones.” Disponible en: <https://elpais.com/internacional/2023-02-09/ee-uu-asegura-que-el-globo-chino-tenia-antenas-para-interceptar-senales-de-comunicaciones.html#>, Última consulta: 19-01-2024.
- [123] David Alandete, “Ee.uu. derriba el globo espía de china en medio de la tensión entre ambos países.” Disponible en: <https://www.abc.es/internacional/maxima-tension-eeuu-china-globo-espia-20230204193028-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Finternacional%2Fmaxima-tension-eeuu-china-globo-espia-20230204193028-nt.html>, Última consulta: 19-01-2024.
- [124] Agencias, El confidencial, “Eeuu responsabiliza a irán del ataque con dron a tres soldados en jordania.” Disponible en: https://www.elconfidencial.com/mundo/2024-01-28/eeuu-acusa-iran-ataque-dron-soldados-jordania_3819544/, Última consulta: 25-01-2024.
- [125] aeronavesmilitaresespanolas.com, “Aeronaves militares españolas. mq-9 predator b.” Disponible en: <https://aeronavesmilitaresespanolas.com/mq-9-predator/>, Última consulta: 25-01-2024.

- [126] UMILES, “Aeronaves militares españolas. mq-9 predator b.” Disponible en: [¿QuÃ©sonlosdronesdecargaycuÃ¡lessusfunciones?](#), Última consulta: 29-01-2024.
- [127] idc.apddrones.com, “La revolución en el aire: Cómo los drones están transformando el transporte y la logística.” Disponible en: <https://idc.apddrones.com/transporte/uso-de-drones-en-transporte-y-logistica/>, Última consulta: 29-01-2024.
- [128] Finacial Food, “Drones en la distribución urbana de mercancías: experiencias internacionales y potencial futuro.” Disponible en: <https://finacialfood.es/drones-en-la-distribucion-urbana-de-mercancias-experiencias-internacionales-y-potencial-futuro/> Última consulta: 01-02-2024.
- [129] Aero Expo, “Dron profesional cargo robot.” Disponible en: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/multirotor-service-dronede-gmbh/product-173931-73398.html>, Última consulta: 01-02-2024.
- [130] Aero Expo, “Dron industrial.” Disponible en: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/draganfly-drones/product-175762-76198.html>, Última consulta: 01-02-2024.
- [131] Redacción ruta del transporte, “Los drones de reparto, un horizonte lejano.” Disponible en: https://www.rutadeltransporte.com/supply-chain/drones-reparto-horizonte-lejano_0_1797720215.html, Última consulta: 02-02-2024.
- [132] Rosa matas, “De controlar las vacas a repartir paquetes con drones en la val d’aran.” Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/local/catalunya/20231220/9462806/val-d-aran-prueba-drones-repartir-paquetes.html>, Última consulta: 03-02-2024.
- [133] Servinformática. Technology and global solutions, “El dron ehang 184 autotripulado ya es capaz de transportar pasajeros.” Disponible en: <https://servinformatica.com/es/blog/el-dron-ehang-184-autotripulado-ya-es-capaz-de-transportar-pasajeros-98.html>, Última consulta: 05-02-2024.
- [134] Volocopter, “Welcome to volocopter.” Disponible en: <https://www.volocopter.com/en>, Última consulta: 05-02-2024.
- [135] Jobyaviation, “Electric aerial ridesharing.” Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/>, Última consulta: 05-02-2024.
- [136] Reuters, “Air taxi startup volocopter to sell 150 aircraft to china jv.” Disponible en: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/air-taxi-startup-volocopter-sell-150-aircraft-china-jv-2021-09-22/>, Última consulta: 05-02-2024.

-
- [137] Universidad de Colima, “¿que es la topografía?” Disponible en: <https://portal.ucol.mx/fic/topo05.htm#:~:text=La%20topograf%C3%ADa%20es%20la%20ciencia,de%20distancias%2C%20direcciones%20y%20elevaciones>, Última consulta: 05-02-2024.
- [138] Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, “La topografía digital.” Disponible en: <https://figmmg.unmsm.edu.pe/?p=5896#:~:text=La%20topograf%C3%ADa%20digital%20no%20es,%2C%20hidrograf%C3%ADa%2C%20sembr%C3%ADos%2C%20etc>, Última consulta: 06-02-2024.
- [139] wingtra.com, “Topografía y sig.” Disponible en: <https://wingtra.com/es/drones-aplicaciones-cartograficas/topografia-sig/>, Última consulta: 06-02-2024.
- [140] Jorge Gómez, El debate, “Los drones han cambiado la guerra.” Disponible en: https://www.eldebate.com/espana/defensa/20240204/drones-han-cambiado-guerra_171268.html, Última consulta: 09-02-2024.
- [141] Felix Light, Reporte de Reuters, “Aumenta la producción de drones militares rusos, según el ministro de defensa.” Disponible en: <https://es.investing.com/news/world-news/aumenta-la-produccion-de-drones-militares-rusos-segun-el-ministro-de-defensa-2564860>, Última consulta: 09-02-2024.
- [142] Infobae América, “Así es el predator b, el mayor dron del ejército del aire que el gobierno armará con misiles hellfire.” Disponible en: <https://www.infobae.com/espana/2023/11/25/asi-es-el-predator-b-el-mayor-dron-del-ejercito-del-aire-que-el-gobierno-armara-con-misiles-hellfire>, Última consulta: 12-02-2024.
- [143] Aeronaves militares españolas, “Mq-9 predator b.” Disponible en: <https://aeronavesmilitaresespanolas.com/mq-9-predator/>, Última consulta: 12-02-2024.
- [144] China Defence Website, “Uav casc rainbow ch-4.” Disponible en: <https://es.militarydrones.org.cn/ch-4-rainbow-uav-drone-china-price-manufacturer-p00095p1.html>, Última consulta: 12-02-2024.
- [145] wikiwand.com, “Elbit hermes 900.” Disponible en: https://www.wikiwand.com/es/Elbit_Hermes_900, Última consulta: 15-02-2024.
- [146] Forces.net, “Ukraine plans to develop drones to attack exploding russian aerial weapons, official says.” Disponible en: <https://www.forces.net/ukraine/ukraine-plans-develop-drones-attack-exploding-russian-aerial-weapons-official-says>, Última consulta: 20-02-2024.

- [147] Comisión Europea, “Reglamento del parlamento europeo y del consejo por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial (ley de inteligencia artificial) y se modifican determinados actos legislativos de la unión.” Disponible en: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-8115-2021-INIT/es/pdf>, Última consulta: 09-03-2024.
- [148] Ramón Fernández, F., *Régimen jurídico de los drones: Inteligencia artificial, responsabilidad, usos y conflictos*. Valencia: Aranzadi, 2023.
- [149] Europapress, “El precio medio de la luz cierra 2023 en 87,1 euros/mhw, un 58% menos que en 2022” <https://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-precio-medio-luz-cierra-2023-871-euros-mhw-58-menos-2022-20231230145959.html>, Última consulta: 09-03-2024.