



ESCUELA DE INGENIERÍA DE FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL  
EN AERONAVEGACIÓN (GIAA)

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**INTEGRACIÓN DE SISTEMAS AÉREOS NO  
TRIPULADOS PARA EL TRANSPORTE DE  
MERCANCÍAS EN EL ESPACIO AÉREO  
URBANO DE LA CIUDAD DE ALMERÍA**

Autor: Marina Ruiz Lidueña

Tutor: Antonio García Martins

Curso Académico: 2023/2024

## **AGRADECIMIENTOS**

*Todo esto no hubiese sido posible sin mi familia. Gracias por vuestra ayuda, por levantarme en cada caída, quitarme las lágrimas en cada llanto y hacerme volver aún más fuerte.*

*A mis compañeras de grado que se han convertido en hermanas, grandes luchadoras de las que estoy muy orgullosa y a las que les debo parte de mis logros.*

*Y hacer mención especial a mis padres. Gracias, papá y mamá por darme todo lo que tenéis en vuestras manos y más. Este logro también es vuestro.*

## ÍNDICE

### *Contenido*

AGRADECIMIENTOS.....	1
ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
RESUMEN .....	10
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Motivación .....	12
1.2. Objetivos propuestos .....	12
1.3. Organización del trabajo .....	13
1.4. Herramientas utilizadas .....	14
1.5. Competencias adquiridas y demostradas .....	14
2. ASPECTOS GENERALES .....	15
2.1. Definición y Denominación .....	15
2.2. Clasificación.....	15
3. OPERACIONES DE LOS UAS.....	18
3.1. Categoría abierta.....	18
3.2. Categoría específica .....	18
3.2.1. Escenarios estándar .....	18
3.2.2. PDRA (Predefined Risk Assessment) y autorización operacional .....	19
3.2.3. Evaluación de riesgos y autorización operacional.....	19
3.3. Categoría certificada .....	19
4. DISTRIBUCIÓN DEL ESPACIO AÉREO DE ACUERDO CON LA NORMATIVA ACTUAL.....	20
5. INSERCCIÓN DE UAS EN EL ESPACIO AÉREO DE ALMERÍA .....	20
5.1. Factores socioeconómicos .....	20
5.2. Análisis del espacio aéreo almeriense en la actualidad .....	21
6. PROPUESTA DE MEJORA DEL TRÁFICO ÁEREO URBANO EN ALMERÍA .....	26
6.1. Razones por las que se necesita un nuevo sistema .....	26
6.2. Factores en consideración para la creación de un nuevo espacio aéreo.....	27
6.2.1. Factores de seguridad .....	27
6.2.2. Factores sociales .....	27
6.2.3. Factores operacionales del sistema .....	28
6.2.4. Factores operacionales de la aeronave.....	29

7.	NUEVAS ESTRUCTURAS AÉREAS.....	29
7.1.	Zonificación por alturas.....	29
7.2.	Zona IV. Estructuración basada en tubos.....	31
7.3.	Zona III. Zona de seguridad .....	33
7.4.	Zona II. Zona de sUAS.....	33
7.5.	Vertipuertos .....	36
7.5.1.	Incorporación de los vertipuertos con el resto de las estructuras del sistema ..	37
7.5.2.	Zona de operaciones .....	38
7.5.3.	Vertipads .....	44
7.5.4.	Vertihubs .....	45
8.	IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO EN LA CIUDAD DE ALMERÍA PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS.....	45
8.1.	Nueva zona de estudio.....	45
8.2.	Disposición de vertipuertos en la nueva zona de estudio .....	48
8.3.	Conectividad entre vertipuertos .....	53
8.4.	Comparativa de la disposición urbanística con la aérea .....	54
9.	DEFINICIÓN DE INCÓGNITAS DE DIMENSIONAMIENTO .....	56
9.1.	Definición de incógnitas del problema.....	56
10.	ANÁLISIS DE FLUJO DE UN sUAS Y CÁLCULO DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD.....	57
10.1.	Análisis de flujo .....	58
10.1.1.	Hélice de estudio y metodología.....	58
10.2.	Resultados de mediciones y análisis de flujo en vuelo a punto fijo.....	60
10.2.1.	Resultados de mediciones PIV-Free Run.....	60
10.2.2.	Resultados de mediciones PIV-Phase Locked .....	61
10.3.	Resultados de mediciones y análisis de flujo en vuelo en avance .....	65
10.3.1.	Medidas de fuerzas aerodinámicas.....	66
10.3.2.	Mediciones de campo de flujo .....	67
10.4.	Alcance del flujo .....	71
10.5.	Cálculo de distancias .....	75
10.5.1.	Distancias de seguridad en vuelo en avance con velocidad inicial de 10 m/s y 10° de inclinación .....	75
10.5.2.	Distancias de seguridad en vuelo sostenido con un ángulo de inclinación de 10°	77
10.5.3.	Comparativa entre las distancias de seguridad calculadas para los casos en vuelo sostenido y en avance .....	79
10.6.	Errores cometidos .....	80

11.	DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS AÉREAS EN LA CIUDAD DE ALMERÍA PARA SUAS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS.....	81
11.1.	Declaración de medidas de seguridad de acuerdo con el diámetro del UAV.....	81
11.2.	Definición de dimensiones de las estructuras aéreas.....	83
11.2.1.	Distancias desarrolladas en el plano vertical.....	84
11.2.2.	Distancias desarrolladas en el plano horizontal.....	85
11.3.	Distribución de sUAS en las distintas capas del sistema.....	89
11.4.	Zonas conflictivas y mitigaciones.....	91
12.	RESULTADO FINAL DEL NUEVO ESPACIO AÉREO EN ALMERÍA.....	92
13.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	94
13.1.	Objetivos alcanzados.....	94
13.2.	Trabajos futuros.....	95
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	96
	ANEXO I. GLOSARIO.....	102
	ANEXO II. LISTA DE SÍMBOLOS.....	103
	ANEXO III. DEFINICIONES DEL ESPACIO AÉREO ACTUAL.....	104
A.	Regiones de información de vuelo.....	104
A3.1.	Región inferior FIR.....	104
A3.2.	Región superior UIR.....	105
B.	Clasificación y Estructura del Espacio Aéreo en España.....	105
B3.1.	Espacio Aéreo Controlado.....	106
B3.2.	Espacio Aéreo No Controlado.....	106
	ANEXO IV. ZONIFICACIÓN.....	108
	ANEXO V. ESTRUCTURA FINAL DEL NUEVO ESPACIO AÉREO.....	111

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Faseado y paquetes de trabajo para la realización del trabajo, elaboración propia.....	13
Ilustración 2.- Diagrama de Gantt del proyecto, elaboración propia.....	13
Ilustración 3.- Mapa geográfico de Almería con leyenda de los puntos más destacables, elaboración propia con MyMaps de Google.....	21
Ilustración 4.- Zona de estudio con una circunferencia de 15km de radio e indicador de norte.....	22
Ilustración 5.- Zonas restringidas al vuelo fotográfico (ZRVF).....	22
Ilustración 6.- NOTAM activos actualizados 06/10/2022.....	23
Ilustración 7.- Ejemplos de notificación NOTAM activos.....	23
Ilustración 8.- Espacio aéreo controlado y LED 36.....	24
Ilustración 9.- Áreas restringidas para un vuelo de operaciones especializadas, VLOS y fotográfico en la zona de estudio.....	25

Ilustración 10.- Áreas restringidas para un vuelo de operaciones especializadas, BVLOS y ZRVF en la zona de estudio .....	25
Ilustración 11.- Clases del espacio aéreo en la actualidad, fuente FAA [23] .....	29
Ilustración 12.- Nueva división de zonas basada en distintas altitudes, elaboración propia .....	31
Ilustración 13.- Tubo de vuelo mostrando el doble sentido de la estructura, fuente [23].....	32
Ilustración 14.- Estructura aérea basada en tubos aplicada en la zona IV, fuente [23].....	33
Ilustración 15.- Resultado de la implementación de capas en un ambiente urbano, fuente [34] .....	34
Ilustración 16.- Estructura de un carril y una banda de carriles, fuente [35] .....	35
Ilustración 17.- Distancias a calcular de la estructura “capa”, elaboración propia .....	35
Ilustración 18.- Instalaciones por las que se compondrá un vertipuerto, elaboración propia...	37
Ilustración 19.- Vista en alzado de la intersección del vertipuerto con el resto de las estructuras aéreas, elaboración propia.....	37
Ilustración 20.- Vista en planta de la intersección del vertipuerto con el resto de las estructuras aéreas, elaboración propia.....	38
Ilustración 21.- Vista en planta de la plataforma de operaciones, elaboración propia.....	38
Ilustración 22.- Partes por las que se conformará una base de vuelo de acuerdo con FAA [40]	39
Ilustración 23.- Plataforma de operaciones simplificada, acotada y cálculo de superficies totales, elaboración propia .....	41
Ilustración 24.- Vista en alzado del aterrizaje de un sUAS, elaboración propia .....	42
Ilustración 25.- Vista genérica del aterrizaje y despegue de sUAS en un vertipuerto, elaboración propia .....	42
Ilustración 26.- Vista en planta de la plataforma de operaciones simplificada, elaboración propia .....	43
Ilustración 27.- Vista en planta plataforma de vuelo vertipad, elaboración propia .....	44
Ilustración 28.- Visión general del concepto Vertihub [44] .....	45
Ilustración 29.- Tres ubicaciones de relevancia de la geografía almeriense para el transporte de mercancías, elaboración propia con MyMaps de Google.....	46
Ilustración 30.- Zonas de seguridad (marcados en naranja) y vertipuertos (marcados en verde) de los tres puntos clave, elaboración propia con la app de Enaire.....	46
Ilustración 31.- Área y superficie de aproximación del aeropuerto de Almería donde el vuelo de UAS queda totalmente prohibido, elaboración propia.....	47
Ilustración 32.- Pendiente de ascenso en la zona III de los vertipuertos transcurrida entre los 150 y 180 metros, fuente [47] .....	48
Ilustración 33.- Estudio del radio de la base superior con 10° de inclinación de ascenso y descenso, elaboración propia .....	49
Ilustración 34.- Estudio del radio de la base superior con 7° de inclinación de ascenso y descenso, elaboración propia .....	49
Ilustración 35.- Dimensionamiento de zona de seguridad troncocónica de los vertipuertos, elaboración propia .....	49
Ilustración 36.- Dimensionamiento vertipuerto, elaboración propia .....	50
Ilustración 37.- Localización lateral del vertipuerto con respecto a los ejes de pista, elaboración propia .....	50
Ilustración 38.- Dos posibles ubicaciones del vertipuerto 2 en las áreas circundantes del Aeropuerto de Almería, elaboración propia .....	51
Ilustración 39.- Emplazamiento del vertipuerto sobre un terreno sin edificación previa, elaboración propia .....	51

Ilustración 40.- Ubicación del vertipuerto elevado sobre la superficie del puerto de Almería, elaboración propia .....	52
Ilustración 41.- Ubicación del posible vertipad de la ciudad de Almería sobre la azotea del Hotel Vértice Indalo Almería, elaboración propia .....	52
Ilustración 42.- Trayectorias de conexión entre los vertipuertos y amplificación de un tramo aparentemente impreciso, elaboración propia .....	53
Ilustración 43.- Demostración de la estructuración de las trayectorias en capas superpuestas, elaboración propia .....	53
Ilustración 44.- Señalización de los dos posibles estudios de simplificación de trayectorias, elaboración propia .....	54
Ilustración 45.- Posible solución por semáforos ante la problemática de las intersecciones de capas, fuente [35].....	55
Ilustración 46.- Solución de las intersecciones de capas del mismo nivel a través de una doble altura, elaboración propia.....	55
Ilustración 47.- Resultado final de la incorporación de dobles alturas en las capas con el fin de dar solución a la intersección entre ellas, elaboración propia .....	55
Ilustración 48.- Declaración de distancia de seguridad entre dos sUAS dentro de un mismo carril en la dirección de avance, elaboración propia .....	56
Ilustración 49.- Declaración de distancias laterales entre carriles de mismo y distinto sentido, elaboración propia .....	57
Ilustración 50.- Dimensiones del rotor de estudio (se ha tener en cuenta que en los estudios se ha considerado la estructura de soporte del rotor), fuente [50].....	59
Ilustración 51.- Configuración para toma de medidas PIV para el caso de 2 rotores, fuente [50] .....	59
Ilustración 52.- Configuración para toma de medidas PIV para el caso de un único rotor, fuente [51] .....	59
<i>Ilustración 53.- Barra gráfica de valores de velocidad para el estudio [51].....</i>	60
<i>Ilustración 54.- Barra gráfica de valores de velocidad para el estudio [50].....</i>	60
Ilustración 55.- Medidas PIV en Free Run del campo de velocidades, fuente [51] .....	61
Ilustración 56.- Medidas PIV en Free Run del campo de velocidades fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha) .....	61
<i>Ilustración 57.- Campo de velocidades promedio para <math>\theta=0^\circ</math>, fuente [51] .....</i>	62
<i>Ilustración 58.- Campo de velocidades promedio para <math>\theta=0^\circ</math>, fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha) .....</i>	62
<i>Ilustración 59.- Campo de velocidades promedio para <math>\theta=120^\circ</math>, fuente [51] .....</i>	62
<i>Ilustración 60.- Campo de velocidades promedio para <math>\theta=120^\circ</math>, fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha) .....</i>	62
<i>Ilustración 61.- Campo de velocidades promedio para <math>\theta=0^\circ</math>, fuente [50] .....</i>	63
<i>Ilustración 62.- Campo de velocidades promedio para <math>\theta=120^\circ</math>, fuente [50] .....</i>	63
<i>Ilustración 63.- Distribución de vorticidad para <math>\theta=0^\circ</math>, fuente [51] .....</i>	64
<i>Ilustración 64.- Distribución de vorticidad para <math>\theta=0^\circ</math>, fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha) .....</i>	64
Ilustración 65.- Distribución de vorticidad para $\theta=120^\circ$ , fuente [51].....	65
Ilustración 66.- Distribución de vorticidad para $\theta=120^\circ$ , fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha) .....	65
Ilustración 67.- Representaciones gráficas de la sustentación frente a la potencia en diferentes ángulos de inclinación, fuente [51] .....	66

Ilustración 68.-Representaciones gráficas de la sustentación frente a la velocidad angular (RPS) para diferentes ángulos de inclinación, fuente [51] .....	67
Ilustración 69.- Resultados PIV en “Free Run” para vuelo en avance con velocidad inicial de 10 m/s, fuente [51] .....	68
Ilustración 70.- Comparación de velocidad en diferentes ubicaciones ( $1R_{hélice}$ , $1,5R_{hélice}$ ) aguas abajo en vuelo en avance, fuente [51].....	69
Ilustración 71.- Diferencia de tendencias en $Y/R_{hélice}=-0,8$ en las gráficas de velocidad entre las distancias de $1R_{hélice}$ y $1,5R_{hélice}$ , fuente [51] .....	69
<i>Ilustración 72.- Extrapolación de la diferencia de tendencias en las velocidades en el gráfico de medidas PIV, fuente [51]. Se ha señalado la zona próxima a <math>Y/R_{hélice}=-0,8</math>.....</i>	<i>69</i>
Ilustración 73.-Resultados de medición de PIV con “Phase Locked” en $\psi=270^\circ$ con un radio del 90 %.....	70
Ilustración 74.- Comparación de velocidad en diferentes ubicaciones aguas abajo ( $-0,15R_{hélice}$ , $-0,2R_{hélice}$ , $-0,25R_{hélice}$ ) en vuelo en avance, fuente [51].....	71
<i>Ilustración 75.- Resultados SPIV del campo de velocidad medio para las configuraciones de rotor único (izquierda) y rotor doble (derecha, <math>L = 0,05D_{hélice}</math>) en el plano transversal <math>Z/D_{hélice} = 0,1</math>, fuente [50].....</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 76.- Resultados SPIV del campo de velocidad medio para las configuraciones de rotor único (izquierda) y rotor doble (derecha, <math>L = 0,05D_{hélice}</math>) en el plano transversal <math>Z/D_{hélice} = 1,0</math>, fuente [50].....</i>	<i>72</i>
Ilustración 77.-Resultados SPIV medidos del campo de velocidad medio para las configuraciones de rotor único (izquierda) y rotor doble (derecha, $L = 0,05D_{hélice}$ ) en las localizaciones $Z/D_{hélice} = 0,1, 0,5, 1,0$ , fuente [53] .....	73
Ilustración 78.- Plano de corte vertical a través del plano de las palas del rotor, que muestra la velocidad (izquierda) y el gráfico volumétrico de vorticidad (derecha) para el caso de resolución fija, fuente [53].....	74
Ilustración 79.- Geometría de un rotor en vuelo en avance, elaboración propia.....	75
Ilustración 80.- Distancias de seguridad entre sUAS en vuelo en avance, elaboración propia ..	76
Ilustración 81.- Geometría de un rotor inclinado en vuelo sostenido, elaboración propia.....	78
Ilustración 82.- Distancias de seguridad entre sUAS en vuelo sostenido con un ángulo de inclinación de $10^\circ$ , elaboración propia.....	79
Ilustración 83.- Cálculo de diámetro equivalente de dron aplicado al modelo Hércules 20, elaboración propia .....	81
Ilustración 84.- Declaración de la distancia vertical existente entre capas, elaboración propia	85
Ilustración 85.- Cruce ejemplar dentro de la zona estudio y con gran interés mercantil y económico.....	86
Ilustración 86.- Distancia de ancho de calle de Avenida Pablo Iglesias, elaborado con GoogleMyMaps .....	86
Ilustración 87.- Distancia de ancho de calle Puerta Purchena, elaborado con GoogleMyMaps	86
Ilustración 88.- Distancia de ancho de calle de Puerta Purchena, elaborado con GoogleMyMaps .....	86
Ilustración 89.- Distancia de ancho de calle de Paseo de Almería, elaborado con GoogleMyMaps .....	86
Ilustración 90.- Número de carriles disponibles para el sUAV SymaX8C en una calle de 6m de ancho, elaboración propia .....	87
Ilustración 91.- Número de carriles disponibles para el sUAV FDG815 en una calle de 6m de ancho, elaboración propia .....	88

Ilustración 92.- Número de carriles disponibles para el sUAV Wingcopter 178 Heavy Lift en una calle de 6m de ancho, elaboración propia .....	89
Ilustración 93.- Distribución de sUAS en las ocho capas disponibles de la zona II de estudio, elaboración propia .....	91
Ilustración 94.- Resultado final de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Aeropuerto de Almería, elaboración propia .....	93
Ilustración 95.- Nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Aeropuerto de Almería donde se observa la adaptación de la geografía aérea a la urbana ya existente, elaboración propia .....	93
Ilustración 96.- Resultado final de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Puerto marítimo de Almería, elaboración propia .....	93
Ilustración 97.- Vista ampliada de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Puerto marítimo de Almería, elaboración propia .....	93
Ilustración 98.- Resultado final de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el polígono de San Rafael, elaboración propia .....	93
Ilustración 99.- Vista ampliada de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el polígono de San Rafael, elaboración propia .....	93
Ilustración 100.- Distribución FIR en España, fuente [62] .....	104
Ilustración 101.- Áreas por las que se compone FIR, fuente [63] .....	105
Ilustración 102.- Clasificación del espacio aéreo, fuente [63] .....	106
Ilustración 103.- Ampliación en detalle de la Ilustración 94 .....	111
Ilustración 104.- Ampliación en detalle Ilustración 95.....	111
Ilustración 105.- Ampliación en detalle Ilustración 96.....	112
Ilustración 106.- Ampliación en detalle Ilustración 97.....	112
Ilustración 107.- Ampliación en detalle Ilustración 98.....	113
Ilustración 108.- Ampliación en detalle Ilustración 99.....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Clasificación de UAS de acuerdo con la normativa europea, fuente [2] .....	16
Tabla 2.- Zonas de sobrevuelo y UAS operables en las subcategorías A1, A2, A3, fuente [4] ....	18
Tabla 3.- Definición y restricciones de los escenarios estándares, fuentes [7][8] .....	19
Tabla 4.- Distancias de seguridad declaradas para vuelo en avance, elaboración propia.....	77
Tabla 5.- Distancias de seguridad declaradas para vuelo sostenido, elaboración propia .....	79
Tabla 6.- Comparativa entre distintos modelos de UAVs con el objetivo de mostrar la relación entre sus diámetros .....	82
Tabla 7.- Distancias de seguridad expresadas en DUAV para vuelo en avance, elaboración propia .....	83
Tabla 8.- Distancias de seguridad expresadas en DUAV para vuelo en punto fijo, elaboración propia .....	83
Tabla 9.- Tabla resumen distancias declaradas en apartados anteriores para la definición de las estructuras aéreas desarrolladas en la Zona II, elaboración propia .....	83
Tabla 10.- Tabla resumen horquillas de tamaño de acuerdo con el número de carriles disponibles, elaboración propia .....	90
Tabla 11.- Zonas conflictivas y las mitigaciones procedentes, elaboración propia .....	91
Tabla 12.- Metodología para conseguir los objetivos propuestos, elaboración propia .....	94

Tabla 13.- Clasificación de los espacios aéreos ATS y servicios y requisitos suministrados, fuente [61] ..... 107

Tabla 14.- Zonificación del espacio aéreo nacional de acuerdo con AESA [11], elaboración propia ..... 108

## RESUMEN

El crecimiento exponencial del mercado UAS (*Unmanned Aerial System*) en la última década ha conllevado que la legislación encargada de regular su funcionamiento y garantizar la seguridad en sus operaciones haya quedado obsoleta. El estado del espacio aéreo actual para las operaciones con UAS resulta demasiado rígido y restrictivo, siendo así inviable la realización de vuelos de manera frecuente.

Con el objetivo de abordar dichos problemas, en este proyecto se ha propuesto un nuevo espacio aéreo donde se compatibilice el curso de la aviación general existente con la incorporación de las operaciones regulares mediante sistemas aéreos no tripulados.

El nuevo espacio aéreo propuesto está basado en una serie de estructuras aéreas. Previo a ello se han analizado unos factores de viabilidad del proyecto, así como algunos de los posibles problemas que podrían surgir con sus correspondientes mitigaciones.

Además, tras el estudio de numerosos factores socioeconómicos, se ha decidido como emplazamiento para una primera implementación a la ciudad de Almería debido a su versatilidad de infraestructuras y el tamaño de esta.

El nuevo espacio aéreo está dividido en distintas zonas según las alturas de vuelo. Estas zonas comprenden desde donde circularían UAS recreativos hasta PAVs (*Personal Air Vehicle*) para pasajeros. Este estudio se centra en la movilidad aérea urbana de los sUAS (*small UAS*) destinados al transporte de mercancías.

Otra estructura aérea fundamental para el funcionamiento del sistema serán los vertipuertos<sup>1</sup>, siendo estos utilizados para el despegue y aterrizaje de UAS en núcleos urbanos, así como otro tipo de servicios a la operación: mantenimiento, puntos de carga, almacenamiento, etc.

Con el fin de dimensionar las estructuras mencionadas, se analizó una serie de datos experimentales reales sobre la perturbación del flujo creada por un sUAS, llegando finalmente a una declaración de distancias de seguridad que deberían de mantener las aeronaves durante las operaciones de acuerdo con sus tamaños.

Finalmente, tras la valoración y propuesta de diseño de este nuevo espacio aéreo, se espera poder realizar una instauración temprana de dicho modelo debido al estado actual de las tecnologías a bordo de los UAS y los sistemas de navegación y comunicación existentes para este tipo de aeronaves.

---

<sup>1</sup> Entendiéndose por vertipuertos como las plataformas utilizadas por los vehículos aéreos, especialmente eléctricos, para el despegue y aterrizaje vertical. Se podrá encontrar más información de ellos en el apartado 7.5 de este mismo informe.

## ABSTRACT

The exponential growth of the Unmanned Aerial System (UAS) market in the past decade has caused the legislation that regulates its operations and ensures safety to become outdated. The current state of airspace for UAS operations is overly rigid and restrictive, making frequent flights unfeasible.

To address these issues, this project proposes a new airspace where existing general aviation can coexist with regular operations using unmanned aerial systems. The proposed new airspace is based on a series of aerial structures. Viability factors and potential problems with their corresponding mitigations have been analyzed prior to this proposal.

After studying various socio-economic factors, the city of Almería has been chosen as the initial implementation site due to its versatile infrastructure and size.

The new airspace is divided into different zones based on flight altitudes, accommodating recreational UAS up to Personal Air Vehicles (PAVs) for passengers. This study focuses on urban air mobility of small UAS intended for cargo transport.

Vertiports<sup>2</sup> will be a crucial aerial structure for the system's operation, serving as takeoff and landing points for UAS in urban areas, as well as providing other operational services like maintenance, charging points, storage, etc.

To size the mentioned structures, real experimental data on flow disturbance caused by a small UAS was analyzed, leading to safety distance requirements that aircraft should maintain during operations based on their sizes.

Finally, following the evaluation and design proposal of this new airspace, an early implementation of this model is expected due to the current state of onboard UAS technologies and existing navigation and communication systems for such aircraft.

---

<sup>2</sup> Vertiports are understood as platforms used by aerial vehicles, especially electric ones, for vertical takeoff and landing. More information about them can be found in section 7.5 of this same document.

## Capítulo I

# 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

Desde el comienzo del siglo XX se ha impulsado la investigación y desarrollo de las aeronaves no tripuladas pilotadas de forma remota. Las dos guerras mundiales han sido acontecimientos históricos claves para este tipo de aeronaves, puesto que su primer uso ha sido en el ámbito militar. No ha sido hasta finales de dicho siglo cuando comenzó a emerger usos de carácter civil y comercial.

Las ventajas que estos vehículos presentan para realizar tareas inaccesibles, de carácter peligroso o dificultoso para el ser humano han sido de gran ayuda, creándose así múltiples usos, como su empleo en la agricultura, el control de incendios, búsqueda y rescate de personas, control de contaminación o vigilancia aérea entre otros.

Otro motivo del crecimiento exponencial de este tipo aeronaves es, en parte debido a la facilidad para su obtención. Desembocando esto en una problemática tanto a nivel legal como a nivel ético y de seguridad. Como consecuencia de este desarrollo acelerado, la legislación actual podría ser considerada como bastante restrictiva con el fin de ser garante.

Es aquí donde nace el objetivo de este trabajo, en esa necesidad de la transformación del espacio aéreo actual para la integración de estos nuevos sistemas con el resto de la aviación sin crear ningún tipo de conflicto en las operaciones.

### 1.2. Objetivos propuestos

La solución propuesta a dicha problemática es una nueva organización del espacio aéreo urbano mediante la creación de nuevas estructuras aéreas dedicadas a este tipo de aeronaves, así como la implementación de tecnologías para poder llegar a un alto nivel de control y automatización de este tráfico emergente.

En el proceso de conseguir este resultado final se encuentra un previo proceso de donde emergen una serie de objetivos tales como:

1. Estudiar la viabilidad de implementación de los UAS de transporte según la normativa actual.
2. Diseñar la estructura básica del espacio aéreo para el movimiento de estos vehículos y que sea extrapolable en diferentes emplazamientos.
3. Crear un entorno de movilidad aérea urbana en el que puedan coexistir UAS de distintos tamaños y con distintas tecnologías a bordo.
4. Compatibilidad entre la nueva movilidad aérea urbana con la aviación existente.
5. Creación de nuevas infraestructuras para la puesta en servicio de este tipo de aeronaves.
6. Establecer unas distancias de seguridad entre UAS que mantengan unos niveles de seguridad adecuados.
7. Elaboración de rutas para este tipo de aeronaves.
8. Propuesta de mitigaciones ante posibles riesgos detectados.

### 1.3. Organización del trabajo

Para la realización de este trabajo se ha dividido en 5 fases las cuáles están compuestas a su vez por distintos paquetes de trabajo (WP).

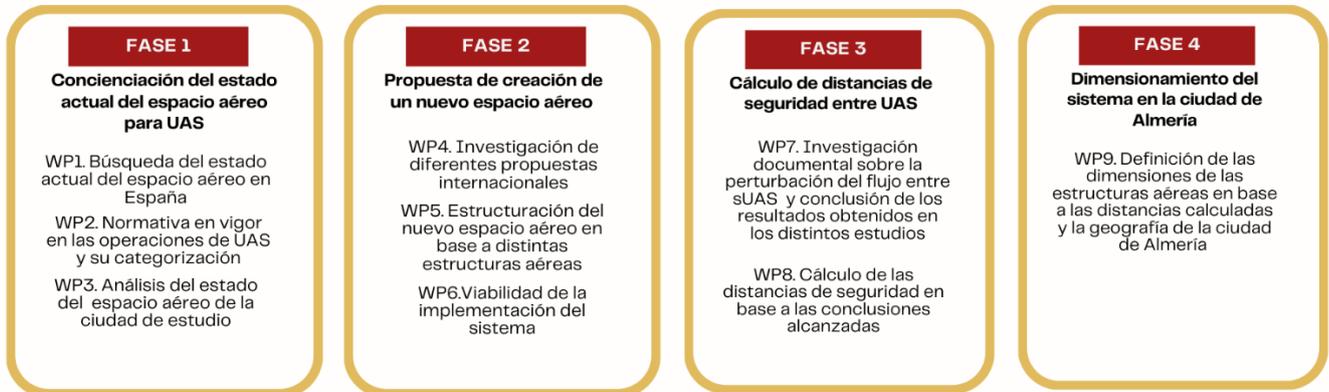


Ilustración 1.- Faseado y paquetes de trabajo para la realización del trabajo, elaboración propia

La planificación temporal de las fases y paquetes de trabajo expuestos quedarían representados en el siguiente Diagrama de Gantt

### DIAGRAMA DE GANTT

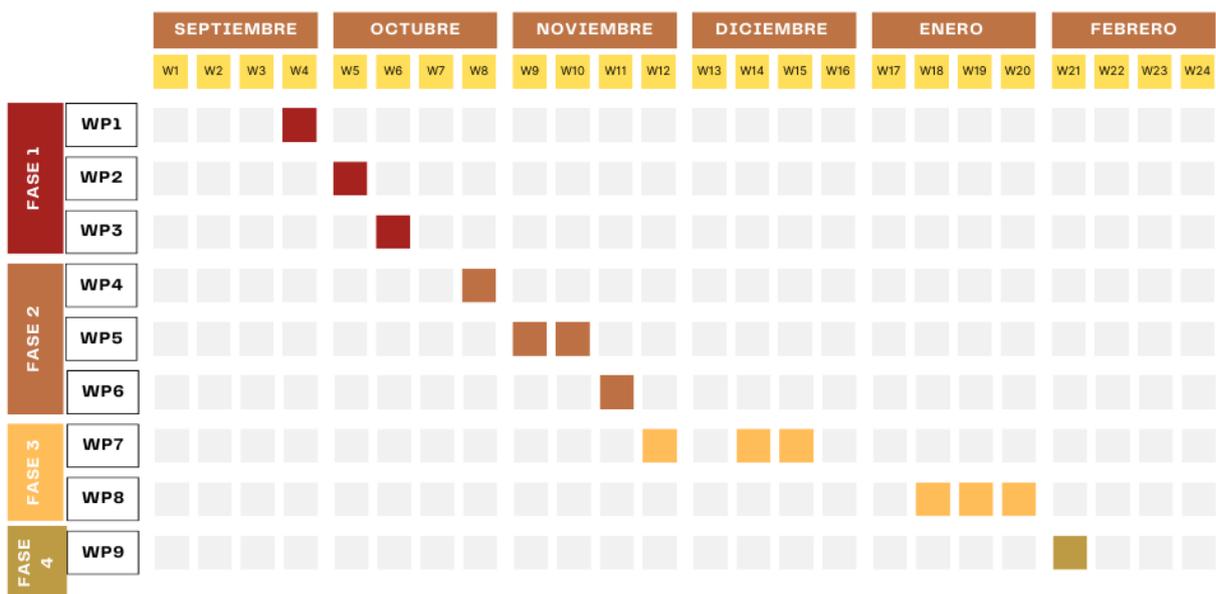


Ilustración 2.- Diagrama de Gantt del proyecto, elaboración propia

Se ha de tener en cuenta que se ha trabajado una media de 5 horas diarias de lunes a viernes durante 14 semanas, por lo que se podría decir que finalmente el tiempo invertido en este trabajo ha sido de aproximadamente de 350 horas.

#### 1.4. Herramientas utilizadas

Para la realización de este proyecto se ha hecho uso de una serie de herramientas

1. App MyMaps by Google para la realización del estudio geográfico de la ciudad de Almería.
2. App Enaire Drones para ser conocedores del estado del espacio aéreo para UAS en el área de estudio.
3. Canva para la generación de imágenes ilustrativas a lo largo del trabajo.
4. Google Earth para mostrar el estado y la ubicación de zonas de estudio.
5. Autodesk para la representación del resultado final de las estructuras aéreas.

#### 1.5. Competencias adquiridas y demostradas

Durante la elaboración de este proyecto se han desarrollado y aplicado una serie de competencias obtenidas durante la formación recibida en diferentes asignaturas del grado.

1. Investigación y análisis de información de carácter legislativo y normativo.
2. Comprensión e interpretación de fundamentos en análisis de flujo.
3. Interpretación y análisis crítico de resultados científicos con el fin sacar una conclusión esclarecedora.
4. Cálculo y dimensionamiento de instalaciones aeroportuarias para el diseño de vertipuertos.
5. Lectura y análisis de diversos tipos de mapas geográficos.
6. Conocimiento del estado actual del espacio aéreo español e interpretación de información aeronáutica.
7. Entendimiento del funcionamiento de las estructuras aéreas y capacidad de creación de un nuevo sistema.
8. Dimensionamiento de estructuras aéreas en función diversos parámetros de diseño tales como el tipo de movilidad, ciudad de aplicación, servidumbres, etc.
9. Identificación de riesgos y propuesta de medidas mitigadoras ante estos.
10. Cálculo de distancias de seguridad entre UAS.
11. Capacidad de planificación y distribución de tareas para el desarrollo y redacción del presente informe.
12. Visión espacial y uso de herramientas de diseño gráfico para la creación de imágenes del resultado final del sistema.

## Capítulo II

# 2. ASPECTOS GENERALES

## 2.1. Definición y Denominación

En la terminología actual para este tipo de vehículos no tripulados se encuentran las siguientes definiciones:

- **Vehículo aéreo no tripulado (VANT o UAV “Unmanned Aerial vehicle” en inglés):** Vehículo aéreo no tripulado guiado por control remoto o programado para realizar un plan de vuelo predefinido [1].
- **Sistema aéreo No tripulado (UAS en inglés):** Sistema aéreo que incluye a la plataforma de vuelo (el UAV), el enlace de comunicaciones y la estación en tierra [1].
- **Aeronave pilotada remotamente (RPA en inglés):** Plataforma de vuelo caracterizada porque su piloto no se encuentra a bordo de la aeronave. En este tipo de aeronaves el piloto opera en todo momento la aeronave de forma remota mediante la estación en tierra y a través de un enlace de datos [1].
- **Sistema aéreo pilotado remotamente (RPAS en inglés).** Es el sistema que abarca tanto a la RPA como al enlace de comunicaciones y la estación en tierra desde la que el piloto al mando de la aeronave la pilotará de forma remota [1].

Como se puede observar, la diferencia entre estas definiciones es que no se especifica en ningún momento que un piloto deba operar a la aeronave en el caso del UAS, siendo imprescindible este hecho en el caso de los RPAS.

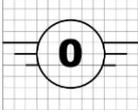
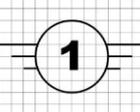
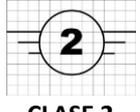
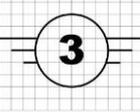
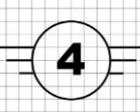
Por lo que finalmente se podría decir que todos los RPAS son UAS, pero no todos los UAS son RPAS [1].

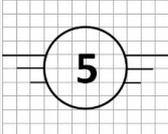
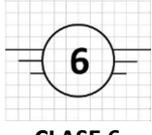
## 2.2. Clasificación

A partir de enero de 2021 comenzó a aplicarse la nueva normativa europea la cual clasificó las aeronaves no tripuladas mediante una etiqueta de identificación de clase[2]. Cada clase engloba una serie de características de la aeronave, los sistemas que la componen y el equipo destinado a controlarla de forma remota. Esto será fundamental para conocer las operaciones que se pueden realizar con cada tipo de UAS.

Según el Reglamento Delegado 2019/945 del 12 de marzo de 2019 [2], se distinguen 7 clases de UAS que van desde el C0 al C6. El fabricante deberá ser el encargado de asignar la categoría a cada UAS, así como las operaciones permitidas con el mismo y la formación necesaria del piloto para poder utilizarlo. En la Tabla 1 se han recopilado los requisitos principales de cada clase de UAS.

Tabla 1.- Clasificación de UAS de acuerdo con la normativa europea, fuente [2]

 <p><b>CLASE 0</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Debe tener un MTOW inferior a 250 gramos.</li> <li>▪ Velocidad máxima de 19 m/s.</li> <li>▪ Tener limitada la altura máxima desde el punto de despegue a 120m.</li> <li>▪ Estar alimentado con baterías eléctricas.</li> <li>▪ Diseño y fabricación optimizado para evitar bordes cortantes o daños con las hélices en caso de accidente.</li> </ul>
 <p><b>CLASE 1</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ MTOW inferior a 900 gramos o que su transmisión de energía en caso de impacto sea inferior a 80 J.</li> <li>▪ Tener una velocidad máxima de vuelo horizontal de 19 m/s.</li> <li>▪ Tener limitada la altura máxima a 120 m.</li> <li>▪ Estar alimentado con baterías con una tensión nominal que no supere los 24V de CC o la tensión de CA equivalente.</li> <li>▪ Poseer de un número de serie único.</li> <li>▪ Disponer de un sistema de identificación a distancia directa y de identificación a distancia de red.</li> <li>▪ Estar equipado con un sistema de geoconsciencia.</li> <li>▪ Tener un sistema de aviso de batería baja en UAS y estación de control.</li> </ul>
 <p><b>CLASE 2</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tener una MTOW inferior a 4 kg.</li> <li>▪ Una altura máxima desde el punto de despegue a 120 m.</li> <li>▪ Salvo si es una aeronave de ala fija, velocidad controlable por el piloto con un modo de velocidad crucero no superior a 3 m/s.</li> <li>▪ Estar alimentado con baterías con una tensión nominal que no supere los 48V de CC o la tensión de CA equivalente.</li> <li>▪ Además, el piloto deberá de recibir mediante telemetría el estado de la carga de la batería en todo momento siendo avisado tanto piloto como estación de control en el caso de batería baja.</li> <li>▪ Estar equipado con un enlace de datos protegido contra el acceso no autorizado a las funciones de mando y control.</li> <li>▪ Tener un sistema de geoconsciencia.</li> <li>▪ Poseer de un número de serie único.</li> <li>▪ Disponer de un sistema de identificación a distancia directa y de identificación a distancia de red.</li> <li>▪ Tener incorporadas luces para control de altitud y vuelo nocturno.</li> </ul>
 <p><b>CLASE 3</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las características de los UAS con la clase C3 serán los mismos que los de la categoría C2 añadiendo las siguientes diferencias</li> <li>▪ MTOW inferior a 25 kilogramos.</li> <li>▪ Tener un dimensión o envergadura alar máxima inferior a 3 metros.</li> </ul>
 <p><b>CLASE 4</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ De nuevo para este tipo de UAS los requisitos utilizados serán los mismos que en las categorías C2 y C3 salvo por las siguientes propiedades</li> <li>▪ Tener un MTOW inferior a 25 kg.</li> <li>▪ No disponer de modos de control automático a excepción de la asistencia para la estabilización del vuelo y para la asistencia en caso de pérdida de enlace.</li> <li>▪ Esta clase está destinada para la práctica del aeromodelismo.</li> <li>▪ Es obligatorio que el control y maniobrabilidad se realice de forma segura por un piloto profesional y según las instrucciones del fabricante.</li> </ul>

 <p><b>CLASE 5</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ MTOW inferior a 25 kilogramos.</li> <li>▪ No ser UAS de ala fija, salvo si es cautivo.</li> <li>▪ Poseer un sistema que proporcione al piloto a distancia información clara y concisa sobre la altura del UAV.</li> <li>▪ Estar equipado con un modo de baja velocidad seleccionable que limite la velocidad a 5 m/s como máximo.</li> <li>▪ Ante una pérdida de enlace de datos, o en caso de fallo, contar con un sistema de recuperación o aterrizaje seguro.</li> <li>▪ Tener un enlace de datos protegidos contra el acceso ilícito a las funciones de mando y control.</li> <li>▪ Solo se permitirá que se alimente mediante electricidad.</li> <li>▪ Sistemas de aviso de baja batería en UAS y estación de control.</li> <li>▪ Disponer de un número de serie único.</li> <li>▪ Contener un sistema de identificación a distancia directa.</li> <li>▪ Poseer un sistema de geoconsciencia.</li> <li>▪ Luces de control de altitud y vuelo nocturno incorporadas.</li> <li>▪ Si el UAS un sistema de limitación de vuelo en zonas o volúmenes concretos del espacio aéreo, éste deberá informar al piloto de tal impedimento.</li> <li>▪ Si un UAS de clase C3 incorpora accesorios o mejoras ubicables dentro de la clase C5, pasará a considerarse UAV de clase C5.</li> <li>▪ El kit de accesorios no incluirá cambios en el software del dron de clase C3.</li> </ul>
 <p><b>CLASE 6</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tener una MTOW inferior a 25 kg.</li> <li>▪ No pueden ser aeronaves de ala fija.</li> <li>▪ Poseer un sistema de información clara sobre la altitud de vuelo, que evite que el UAS traspase los límites, tanto horizontales como verticales, de un espacio operacional programable.</li> <li>▪ Velocidad máxima respecto al suelo en el vuelo horizontal de 50 m/s.</li> <li>▪ Ante una pérdida de enlace de datos, o en caso de fallo, contar con un sistema de recuperación o aterrizaje seguro.</li> <li>▪ Tener un enlace de datos protegidos contra el acceso no autorizado a las funciones de mando y control.</li> <li>▪ Alimentado con electricidad.</li> <li>▪ Sistemas de aviso de baja batería en UAS y estación de control.</li> <li>▪ Disponer de un número de serie único.</li> <li>▪ Contener un sistema de identificación a distancia directa.</li> <li>▪ Poseer un sistema de geoconsciencia.</li> <li>▪ Luces de control de altitud y vuelo nocturno incorporadas.</li> <li>▪ Si el dron dispone de función de limitación de acceso a determinadas zonas o volúmenes del espacio aéreo, esta deberá ser interoperable con el sistema de control del vuelo, y deberá informar al piloto a distancia cuando esta impida entrar al UAV a estas zonas o volúmenes del espacio aéreo.</li> </ul>

### Capítulo III

## 3. OPERACIONES DE LOS UAS

De acuerdo con el Reglamento Ejecutivo (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 mayo de 2019 [3], relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas, aparecerán una serie de categorías en función de la operación que se vaya a realizar. Esto comenzó a ser aplicable a partir del 31 de diciembre de 2020, pero con un periodo de transición.

En base al documento aprobado por AESA, y con el Reglamento Delegado (UE) 2019/945 [2], estas categorías operacionales están basadas en el riesgo de la operación y las actuaciones de los UAS. Es por ello importante conocer estas tres nuevas categorías: “abierta”, “específica” y “certificada”, así como la estrecha relación que tienen con la reciente clasificación de drones explicada anteriormente.

### 3.1. Categoría abierta

Según la página web de AESA [4]: “la categoría operacional denominada como “abierta” hace referencia a todas las operaciones realizadas con UAS que implique un riesgo bajo operacionalmente, como marca la normativa europea y no requieren de ningún tipo de autorización operacional ni de una declaración por parte del operador del UAS previo al vuelo”

La categoría abierta se podría dividir en tres subcategorías: A1, A2 y A3.

Tabla 2.- Zonas de sobrevuelo y UAS operables en las subcategorías A1, A2, A3, fuente [4]

Subcategoría	Zonas de sobrevuelo	UAS Operable
A1	Evitar el sobrevuelo sobre personas no participantes y de concentraciones de personas [4].	C0 y C1 o características semejantes
A2	Distancia horizontal de seguridad sea al menos de 30m con respecto a las personas no participantes [4].	C2 o características semejantes
A3	Zonas en las que no se ponga en riesgo a ninguna persona no participante y a una distancia horizontal de seguridad mínima de 150 m de zonas residenciales, comerciales, industriales o recreativas [4].	C2, C3 o C4 o características semejantes

### 3.2. Categoría específica

Nuevamente haciendo referencia a la definición dada por AESA [5], esta categoría operacional implica un riesgo medio, por lo que antes de la realización de cualquier operación es necesario que el operador registrado en España solicite y obtenga una autorización operacional emitida por AESA o presente una declaración respecto a que la operación puede adaptarse a un escenario estándar. En esta categoría se podrán operar UAS con MTOM > 25 kg, así como enjambres de UAS o su utilización para el transporte de mercancías, a alturas superiores a 120m e incluso sobre concentraciones de personas.

#### 3.2.1. Escenarios estándar

La primera opción que se plantea es que la operación se pueda adaptar a un escenario estándar. Un escenario estándar, según AESA [5], se trata de un tipo de operación predefinida respecto a la cual se ha determinado una lista precisa de medidas de atenuación. Si efectivamente se puede realizar la adaptación, el operador de UAS, deberá presentar ante AESA una declaración operacional de conformidad con un escenario estándar. La operación se podrá realizar una vez

el operador disponga del justificante de presentación emitido por AESA. Dentro de estos escenarios estándar, están los escenarios nacionales (STS-ES)[6] y los escenarios europeos recogidos en el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión [3].

Tabla 3.- Definición y restricciones de los escenarios estándares, fuentes [7][8]

Escenario estándar	Definición	Restricción
<b>STS-ES-01</b>	<i>Operaciones VLOS sobre una zona terrestre controlada en un entorno poblado [7].</i>	Comunicación previa al Ministerio del Interior con al menos 10 días de antelación [7].
<b>STS-01</b>		Disponer de identificación de las clases C5
<b>STS-ES-02</b>	<i>Operaciones BVLOS con observadores del espacio aéreo sobre una zona terrestre controlada en un entorno poco poblado [8]</i>	En espacio aéreo no controlado, es necesario publicar un NOTAM si el vuelo se va a realizar a más de 60 metros de altura [8].
<b>STS-02</b>		Disponer de identificación de las clases C6.

### 3.2.2. PDRA (Predefined Risk Assessment) y autorización operacional

Si la operación requerida no se adapta a ningún escenario estándar, el operador de UAS debe contar con una autorización emitida por la autoridad aeronáutica antes de operar. Para ello ha de presentar una solicitud de autorización operacional basada en la evaluación del riesgo [5].

Es posible que la operación cumpla con una evaluación de riesgos predefinida (PDRA) publicada por EASA. Si esto es así, habrá que presentar junto con la solicitud de autorización, toda la documentación identificada en dicha evaluación [5].

### 3.2.3. Evaluación de riesgos y autorización operacional

En el caso de que la operación no se pudiese acoger ni a un escenario estándar, ni a una PDRA, se debe presentar junto con la solicitud de autorización [5]:

- Evaluación del riesgo de la operación de acuerdo con el artículo 11 del Reglamento (UE) 2019/947 [3].
- Evidencias del cumplimiento de los objetivos de seguridad operacional (OSOs) aplicables al SAIL (*Specific Assurance Integrity Level*) [9] de la operación.

### 3.3. Categoría certificada

Aunque el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 y el Reglamento Delegado (UE) 2019/945[9], ya determinan y marcan con claridad los límites de esta categoría, aún hay aspectos que se encuentran en desarrollo a nivel europeo.

Las operaciones designadas como “certificadas” serán únicamente cuando:

- El UAS tenga una dimensión superior a 3m, su diseño esté certificado por EASA para ser utilizado sobre concentraciones de personas y la operación implica volar sobre concentraciones de personas
- El diseño del UAS está certificado por EASA para el transporte de personas y su operación conlleva el transporte de personas
- El diseño del UAS está certificado por EASA para el transporte de mercancías peligrosas, requiriendo de gran solidez para atenuar los riesgos en caso de accidente, y la operación conlleva el transporte de mercancías peligrosas

## Capítulo IV

### 4. DISTRIBUCIÓN DEL ESPACIO AÉREO DE ACUERDO CON LA NORMATIVA ACTUAL

Aparte de las categorías operacionales de UAS basadas en la legislación europea, si se analiza la legislación nacional aparece el criterio de las zonas geográficas de UAS. De acuerdo con AESA, en su guía sobre zonas geográficas de UAS[11], estas zonas son volúmenes del espacio aéreo en los que se puede permitir, restringir o excluir operaciones con UAS.

La gran diferencia de estas categorizaciones son que en la norma europea se tratan a las reglas de vuelo como generales, es decir, aplicables a todos los operadores. Sin embargo, en la norma nacional sí que se hace distinción según la finalidad de la actividad que se vaya a realizar con el UAS. Es por ello por lo que, cuando se revisan los Reales Decretos 1036/2017 [12] y 1180/2018 [13], aparecerán las terminologías de *actividades recreativas* y *actividades profesionales*. Siendo por tanto de importancia conocer la definición de ambas y la implicación que tiene cada una de ellas.

- **Actividades recreativas:** se refiere a las actividades deportivas, recreativas, de competición y exhibición, así como las actividades propias de las aeronaves de juguete[12].
- **Actividades profesionales:** se refiere a las operaciones aéreas especializadas, también denominadas trabajos técnicos, científicos o trabajos aéreos. Estas se definen como cualquier operación, ya sea comercial o no comercial, en la que se utiliza una aeronave no tripulada para realizar actividades especializadas tales como actividades de investigación y desarrollo, actividades agroforestales, levantamientos aéreos, fotografía, vigilancia, filmación, publicidad aérea, emisiones de radio y televisión, etc.[12].

En base a esta distinción de actividades se han categorizado distintas operaciones dependiendo del escenario donde se vayan a llevar a cabo.

Para conocer más en profundidad la distribución del espacio aéreo de acuerdo con las actividades a desarrollar véase el ANEXO IV. ZONIFICACIÓN de este informe.

## Capítulo V

### 5. INSERCIÓN DE UAS EN EL ESPACIO AÉREO DE ALMERÍA

En este trabajo se tratará de realizar un estudio exhaustivo sobre la posibilidad y mejora de la inserción de UAS en el ambiente urbano de la ciudad de Almería. Para ello, en primer lugar, se realizará una valorización de los factores socioeconómicos por los cuales se ha elegido esta ciudad como escenario de estudio.

#### 5.1. Factores socioeconómicos

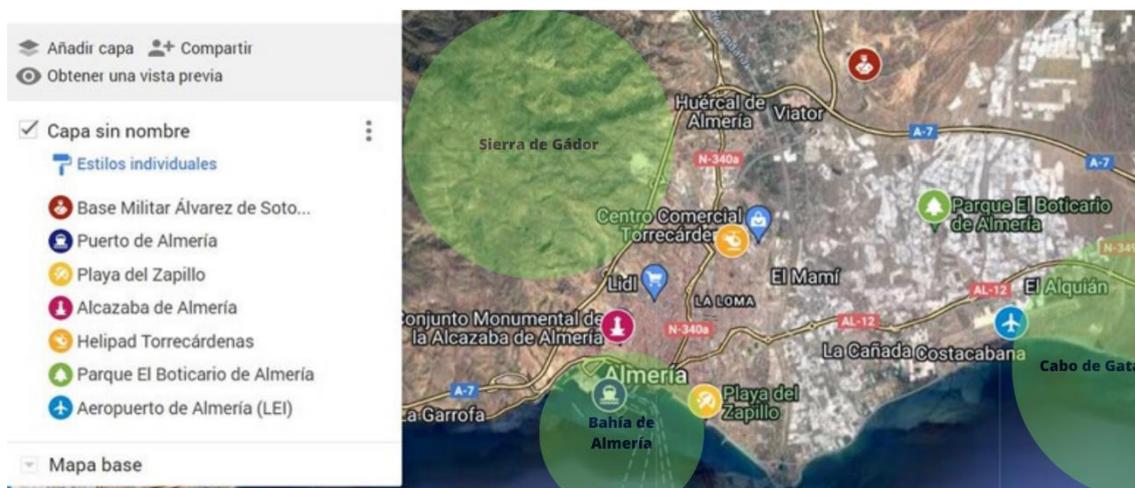
1. Se trata de una ciudad costera, teniendo así un número considerable de playas, así como la localización de un puerto de mercancías, pasajeros y deportivo.

Esta característica puede llegar a ser de gran importancia, ya que, si se tienen en cuenta estos factores a la hora de realizar el estudio del espacio aéreo, esto podría ser extrapolado al resto de ciudades costeras. Siendo España una península donde el número de ciudades

costeras es elevado, el estudio de la integración de UAS en una ciudad como esta podría ser de gran ayuda a nivel nacional.

2. Dentro de la zona de estudio, se hallaría también la presencia de una base militar, en este caso en concreto, la base militar Álvarez de Sotomayor. Esto también será de interés ya que con el fin de optimizar el espacio aéreo y garantizar la seguridad.
3. Siendo uno de los objetivos la inserción de UAS en un ambiente urbano, habrá zonas que se les dotará con una sensibilidad especial. En este caso se tratarán en zonas de importancia histórica y turística como el Conjunto Monumental de la Alcazaba de Almería, teniéndola en consideración para evitar, por ejemplo, una contaminación visual.
4. Otra instalación de interés, en esta ciudad como en muchas otras, se tratará de la presencia del Aeropuerto de Almería (LEI). Disponiendo así de su correspondiente espacio controlado (CTR y ATZ) y área de seguridad.
5. El principal hospital de la ciudad y provincia, el Hospital Universitario Torrecárdenas, también sería una instalación para tener en consideración debido a la disponibilidad en sus instalaciones de un helipuerto (Helipad Torrecárdenas). Por ello, se deberá proteger dicha área y reservar el espacio aéreo para casos de emergencia y evitar colisiones con otras aeronaves.

Todos estos factores hacen de la ciudad de Almería un sitio idóneo para el estudio de la introducción en su espacio aéreo de UAS para el transporte de mercancías en un espacio urbano.



*Ilustración 3.- Mapa geográfico de Almería con leyenda de los puntos más destacables, elaboración propia con MyMaps de Google*

Tras conocer la legislación de zonificación, explicada en el capítulo 4 y ver la geografía general de la ciudad de Almería, así como los puntos de interés desde un punto de vista del espacio aéreo, se pasará a un estudio más exhaustivo y detallado del espacio aéreo actual de esta ciudad.

### 5.2. Análisis del espacio aéreo almeriense en la actualidad

Para realizar este análisis, en primer lugar, haciendo uso de la aplicación de Enaire Drones [14], se ha delimitado la zona en la que se va a centrar el estudio, para ello se ha utilizado una circunferencia con centro en las coordenadas (36.87452483571666, -2.43278634530217) y con un radio de 15km. Se ha escogido esta distancia puesto que se supondrá de la disponibilidad de plataformas como UTM Connect y UTM Hub, conectores que proporcionarán información en

tiempo real a todos los usuarios. Estos sistemas tienen una autonomía de un 15/15, es decir de unos 15 minutos o unos 15km [15].

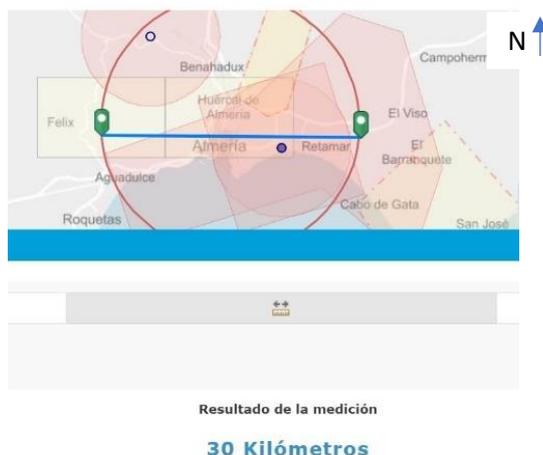


Ilustración 4.- Zona de estudio con una circunferencia de 15km de radio e indicador de norte

Una vez conocida el área de estudio, se realizará un desglose del espacio aéreo de la zona con el fin de conocer capa a capa qué situaciones se deberán de abordar para poder realizar un vuelo en esta área.

En primer lugar, se analizarán a las zonas restringidas al vuelo fotográfico (ZRVF).

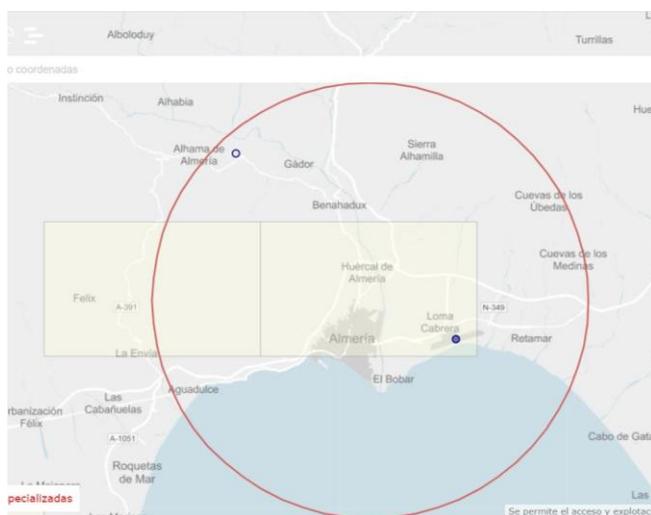
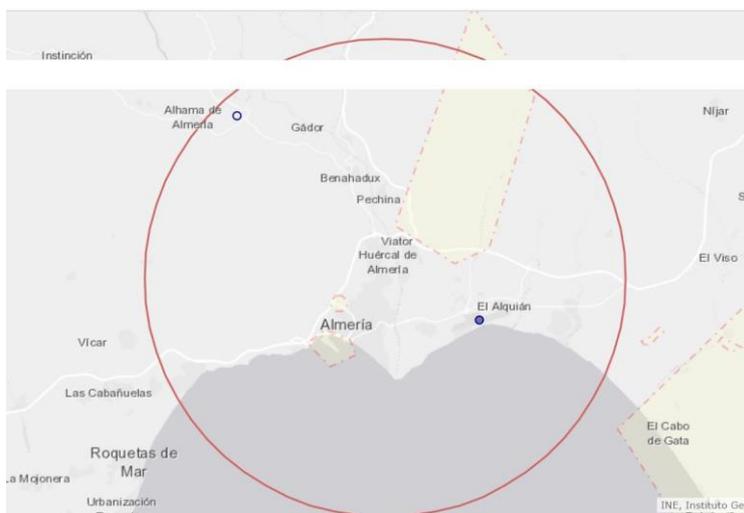


Ilustración 5.- Zonas restringidas al vuelo fotográfico (ZRVF)

En esta capa, las zonas afectadas serán principalmente el centro y oeste del área de estudio. Estas zonas son definidas por el Ministerio de Defensa que, por contener o encontrarse próximas a objetivos clasificados, deben de cumplir con una serie de restricciones como la de no poder realizar ningún tipo de operación con fines fotográficos. Para poder grabar o fotografiar estas zonas con un UAS será obligatorio una consulta al Estado Mayor del Ejército del Aire, el cual decidirá sobre las provisiones y cautelas que el caso exija.

Ahora se analizará la capa de NOTAM (*Notice to Airmen*). Aquí se mostrarán los distintos avisos que informan sobre el establecimiento, condición o modificación de cualquier instalación aeronáutica, servicio, procedimiento o peligro, así como sus límites y/o horarios [16].



*Ilustración 6.- NOTAM activos actualizados 06/10/2022*

Como se pueden observar en la última actualización realizada el 25/02/2024, se encuentran activos 3 NOTAM. Uno de ellos situados sobre el puerto marítimo de la ciudad de Almería, otro en la zona centro de dicha ciudad y, por último, el de mayor extensión el cual coincide con la zona LED 36 perteneciente a la base militar Álvarez de Sotomayor.

Cuando se accede a través de la aplicación de Enaire Drones, las notificaciones que aparecen activas son las siguientes

```
D0362/24
SFC / 02000FT AMSL
DESDE:12/02/2024 08:00:00
HASTA:29/02/2024 20:00:00
HORARIO:12-14 19-22 26-29 0800-1300 1500-2000, 16 23 0800-1300
DESCRIPCIÓN:TEMPORARY SEGREGATED AREA FOR UNMANNED AIRCRAFT VEHICLE FLYING ACTIVATED WI 370116N 0022229W, 365812N 0021955W, 365305N 0022149W, 365235N 0022316W, 365350N 0022547W, 370116N 0022229W (LATERAL LIMITS COINCIDENTAL WITH LED36) ALMERIA/ALVAREZ DE SOTOMAYOR
```

```
R0535/24
SFC / 00100FT AGL
DESDE:02/02/2024 07:00:00
HASTA:02/03/2024 18:00:00
HORARIO:0700-1800
DESCRIPCIÓN:UNMANNED ACFT FLYING WI 1.4NM RADIUS CENTRED ON COORD: 365318N 0022458W
```

```
D0584/24
SFC / 02000FT AMSL
DESDE:05/03/2024 09:00:00
HASTA:29/03/2024 13:00:00
HORARIO:05 12 19 0900-1300 1500-1800 2200-2359, 06-07 13-14 20-21 0000-0200 0900-1300 1500-1800 2200-2359, 15 22 0000-0200 0900-1300, 08 0000-0200, 25-27 0900-1300 1500-1800, 29 0900-1300
DESCRIPCIÓN:TEMPORARY SEGREGATED AREA FOR UNMANNED AIRCRAFT VEHICLE FLYING ACTIVATED WI 370116N 0022229W, 365812N 0021955W, 365305N 0022149W, 365235N 0022316W, 365350N 0022547W, 370116N 0022229W (LATERAL LIMITS COINCIDENTAL WITH LED36) ALMERIA/ALVAREZ DE SOTOMAYOR RNM: THE ACTIVATION/DEACTIVATION OF THIS AREA WILL BE CARRIED OUT IN REAL TIME BY TACTICAL COORDINATION WITH ECAO (OPERATIVE AIR TRAFFIC SQUADRON) SEVILLA AND LEAM TWR.
```

*Ilustración 7.- Ejemplos de notificación NOTAM activos*

En todos los casos se especifica, la altura de la operación, las fechas de inicio y expiración, los horarios permitidos, localización y una pequeña descripción sobre lo sucedido. Es de gran importancia, cada vez que se vaya a realizar una operación con un UAS, revisar previamente los NOTAM activos para así evitar conflictos con otras aeronaves y ser conscientes de la situación actual del espacio aéreo.

La siguiente capa que se analizará será la compuesta por “Alerta” y “Avisos”. En este caso, realmente la única zona que se considera “Aviso”, es la de color amarillo, LED 36 por actividades peligrosas. Para poder sobrevolar por esta zona, al tener un carácter militar, se deberá contar con la autorización previa del Ministerio de Defensa mediante el procedimiento publicado en el AIC NTL 01/22 [11].

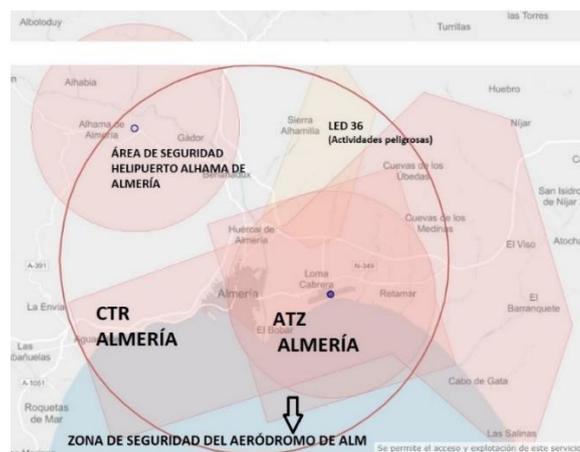


Ilustración 8.- Espacio aéreo controlado y LED 36

Por lo tanto, el resto se encuentran en la misma capa de “Alerta”. Debido a a la presencia del Aeropuerto de Almería (LEI), aparecen una serie de zonas. Por un lado, el ATZ del aeropuerto con su correspondiente área de seguridad de 8 km de radio (LEAM) , en este caso con forma cuadrada que rodea al mencionado ATZ. A su vez englobando a estas dos áreas, se encuentra el CTR de Almería teniendo una extensión considerable. Y por último, en la parte noroeste de la zona de estudio se encuentra el Helipuerto de Alhama de Almería con su área de seguridad (LELM), de nuevo, con un radio de 8 km. El sobrevuelo con UAS en las áreas de seguridad no está permitido salvo que exista coordinación con el aeródromo.

El resto de estas zonas son controladas por lo que para poder acceder a ellas, dependiendo de la categoría operacional habrá que cumplir una serie de requisitos. Si la categoría es abierta habrá que realizar un estudio aeronáutico de seguridad y una previa coordinación con el ATSP, que en este caso en concreto es ENAIRE. Sin embargo, si la operación se realiza en categoría específica, a parte de cumplir todos las exigencias de equipos y formación del piloto, habrá que presentar un estudio aeronáutico de seguridad y una coordinación con ENAIRE, además de una autorización por parte de AESA o una declaración operacional de conformidad con un escenario estándar.

Una vez presentadas todas las capas por las que se compone el espacio aéreo de estudio y se conoce un poco más en profundidad cada una de ellas, se pasará a ver una perspectiva más general. En esto casos se destacarán las condiciones en las que se realizaría un vuelo.

En este primer ejemplo, el tipo de vuelo seleccionado será el de “Operaciones Especializadas”, bajo una condición de VLOS y siendo además un vuelo fotográfico o de vídeo.

En la Ilustración 9 se puede apreciar como aparecen todas las áreas posibles a afrontar si se deseara operar en la zona de estudio. Es decir, el UAS podría enfrentarse hasta a 8 escenarios distintos sin tener en cuenta las zonas de flora y fauna protegidas.

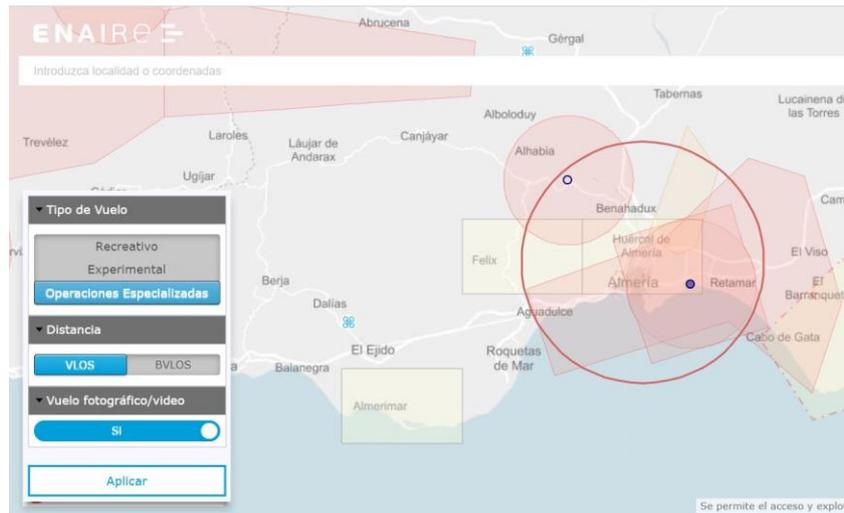


Ilustración 9.- Áreas restringidas para un vuelo de operaciones especializadas, VLOS y fotográfico en la zona de estudio

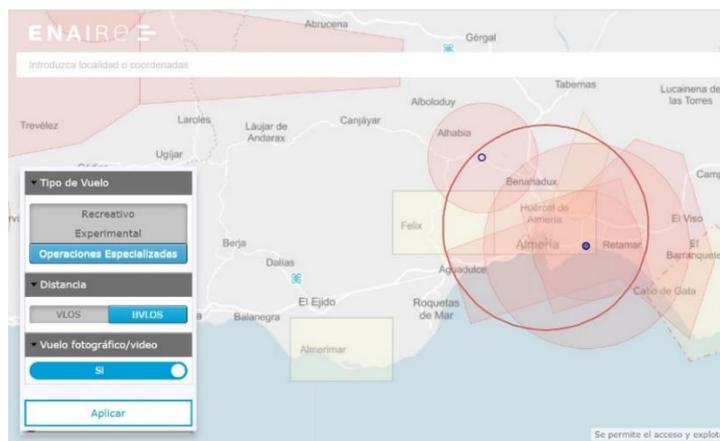


Ilustración 10.- Áreas restringidas para un vuelo de operaciones especializadas, BVLOS y ZRVF en la zona de estudio

Esta nueva zona con forma de circunferencia (Ilustración 10) marca una distancia de seguridad de 15 km con respecto al aeródromo con vuelo instrumental. Se encuentra albergando al ATZ, LEAM y parte del CTR del Almería. En ella no está permitido el vuelo de UAS en BVLOS salvo la existencia de una previa coordinación con el aeródromo. De nuevo, toda esta información ha sido extraída de la aplicación Enaire Drones [14], desde la parte gráfica de mapas, hasta la información sobre la disponibilidad de las zonas, restricciones, etc. Siendo así una herramienta indispensable actualmente para poder realizar una operación de UAS en cualquier lugar de España.

Si se sintetiza todo lo mostrado en este apartado, la conclusión a la que se podría llegar sería que, si se quisiese realizar una operación en el área de estudio y la operación implicara sobrevolar las zonas mostradas habría que:

1. Pedir una autorización previa a los gestores de las zonas protegidas de naturaleza y aves.
2. Consultar al Estado Mayor del Aire, en el que caso de que se quisiese fotografiar u operar en BVLOS en una ZRVF.
3. Tener en cuenta todos los NOTAM activos en la fecha de la operación, así como sus horarios, localizaciones, características, etc.
4. Para sobrevolar LED 36, contar con una autorización previa del Ministerio de Defensa.

5. Para volar áreas controladas, aparte de los estudios aeronáuticos de seguridad, contactar con ENAIRE para la coordinación y, dependiendo el caso, también con AESA para obtener una autorización.
6. Para sobrevolar las áreas de seguridad del aeropuerto/helipuerto contactar también con los gestores de estos.
7. En el caso de querer acogerse a un escenario estándar nacional, STS-ES-01, deberá de comunicárselo al Ministerio del Interior.
8. Y si la operación lo requiriese, tener que contactar con ENAIRE, para poder publicar un NOTAM de la propia operación.

Finalmente, habría que contactar con hasta 7 organismos distintos para poder realizar una operación. Además, habría que hacerlo con antelación mínima de 10 días antes de la fecha del vuelo. Convirtiendo la preparación para una operación de UAS en un proceso tedioso, donde habría que invertir bastante tiempo e implicando un gran esfuerzo por parte del operador del UAS. Esta rigidez del sistema para hacer un vuelo con un UAS es inviable a futuro, ya que de esta manera no se podrían realizar vuelos de manera frecuente. Y es aquí donde surge la necesidad de implementar nuevos sistemas donde volar un UAS no se trate de algo excepcional si no de algo ordinario.

## *Capítulo VI*

# **6. PROPUESTA DE MEJORA DEL TRÁFICO ÁEREO URBANO EN ALMERÍA**

## **6.1. Razones por las que se necesita un nuevo sistema**

Hasta ahora gran parte de la aviación no tripulada se ha mantenido en zonas segregadas de la aviación convencional. Sin embargo, debido al crecimiento exponencial del sector, así como la repercusión y consolidación que está teniendo en numerosas aplicaciones y servicios, aparece un nuevo reto en el sector aeronáutico: la integración de UAS en el espacio aéreo urbano de una forma segura, eficiente y sostenible.

Al principio se barajó la posibilidad de realizar cambios en el sistema existente para su integración, pero esto ha resultado inviable ya que realmente se trabajará sobre una nueva industria. Las aeronaves no tripuladas serán en su mayoría eléctricas, con aterrizaje y despegue vertical, de menores dimensiones y materiales más ligeros, pudiendo ser así más silenciosas, de menor coste y más eficientes que la aviación convencional. Volarán a menor altitud que las aeronaves actuales cubriendo así los cielos urbanos y rurales. Es por ello, que son numerosas las propuestas por parte de numerosos organismos internacionales, así como de empresas privadas, para la ordenación de dicho espacio aéreo.

Uno de los principales objetivos de este nuevo escenario será minimizar los estándares de separación entre UAS. Por un lado, son varias las propuestas que se basan en la creación de una nueva estructuración del espacio aéreo, basado ya pueda ser en: pasillos, carriles con dobles sentidos, capas o incluso haciendo mezclas de varias de ellas, para así poder afrontar una gran densidad de tráfico. Mientras que, por otro lado, otras entidades proponen un nuevo espacio aéreo flexible y abierto donde podrían operar aeronaves que fuesen totalmente autónomas.

Sin embargo, todas las propuestas parten de unos objetivos comunes como la reducción de daños por colisión (ya sea con otras aeronaves o edificios) y el aumento de la capacidad y rendimiento del sistema.

### 6.2. Factores en consideración para la creación de un nuevo espacio aéreo

Para la realización de cualquier diseño de un espacio aéreo urbano, se tendrán en cuenta una serie de factores imprescindibles agrupados en cuatro áreas: factores de seguridad, factores sociales, factores operacionales del sistema y factores operacionales de la aeronave.

#### 6.2.1. Factores de seguridad

##### Evasión de objetos

Las aeronaves, aparte de evitar obstáculos con los sistemas de “sense and avoid” que llevarán a bordo, deberán mantener unas distancias de seguridad entre UAS. Las distancias establecidas actualmente no sirven para un uso en un ambiente urbano, por lo que uno de los objetivos de este trabajo de fin de grado será ese, encontrar qué distancia deberán de mantener los UAS según sus características como peso, dimensiones, equipamiento a bordo, etc. Estas distancias serán una primera aproximación, sin embargo, con una maduración del sistema y el paso del tiempo, estas distancias se podrían ver seguramente reducidas o incluso podrían evolucionar hacia sistemas de separación dinámica sin necesidad de una separación estandarizada.

##### Corrientes de viento transversales

Este factor podría ser decisivo a la hora de decidir si se puede realizar la operación o no. Debido a que unas fuertes corrientes podrían desviar a la aeronave, o hasta ciertas velocidades de viento podría producir una “sobrecorrección” de trayectoria del UAS pudiendo crear una colisión con otra aeronave. Algunos fabricantes de sUAS especifican que estas aeronaves pueden soportar hasta una velocidad de viento de 10 m/s. Sin embargo, de acuerdo con unas pruebas iniciales realizadas por la NASA muestran que un sUAS no puede soportar un vuelo seguro con corrientes transversales de más de 5 m/s [16], *siendo esta por tanto la velocidad considerada como máxima permitida para poder realizar cualquier operación.*

##### Tiempo meteorológico

Aparte de las corrientes de viento, ser conscientes de las condiciones meteorológicas previamente y durante el vuelo es algo imprescindible para poder cumplir con unos mínimos de seguridad. Por lo tanto, para reducir estos riesgos, serán necesarios unos pronósticos del tiempo fiables y precisos, así como una posible implementación de sistemas de geoconsciencia dinámica. En este caso al igual que con el viento, será el operador el encargado de revisar toda esta información y el que podrá tomar la decisión final sobre si la operación se podrá llevar a cabo o no, según lo especificado en su manual<sup>3</sup>.

#### 6.2.2. Factores sociales

Otro factor de relevancia será la opinión pública sobre la implementación de un nuevo sistema de movilidad en ambientes urbanos. Su popularidad dependerá principalmente de tres fenómenos: el ruido, la contaminación visual y la privacidad.

##### Ruido

Esta probablemente será la causa que produzca una mayor molestia entre la población y reducirlo no será para nada una tarea fácil [18] [19]. Una posible solución ante esta situación

---

<sup>3</sup>El manual del operador deberá ser aprobado por la autoridad competente. En España le corresponde a AESA.

sería establecer unos niveles de vuelo no demasiado bajos sobre todo en zonas residenciales para evitar así la exposición que tendría la población al ruido.

#### Contaminación visual

De acuerdo con una encuesta realizada por Airbus [20], el 45% de las respuestas muestran preocupación por la contaminación visual que podrían crear los UAS en las ciudades. Además de esto, según un informe oficial por parte de la empresa Uber [21] se señala que una posible opción para evitar la presencia de estos UAS en zonas sensibles sería disponer este tráfico aéreo sobre carreteras existentes y autopistas. Además de tener que realizar algunas modificaciones para evitar zonas sensibles, como podrían ser los conjuntos monumentales o espacios con un cierto valor histórico.

#### Privacidad

Gran parte de la culpa de que la población sea reacia a la introducción de drones en ciudades es este tema. El miedo de que muchas de estas aeronaves estén equipadas con cámaras hace que el público piense que se va a violar continuamente su libertad y derechos [22]. Una posible medida para atenuar este problema y dar tranquilidad podría ser delimitar zonas en las que se permite el vuelo fotográfico para mantener un cierto control de la toma de datos por parte de las aeronaves. Además, el operador deberá de estar bajo la obligación legal de que el uso de dicha información no se hará con fines distintos para los que fueron obtenidos.

### *6.2.3. Factores operacionales del sistema*

La introducción de un nuevo espacio aéreo trae consigo la creación de un nuevo sistema de gestión de tráfico. En el caso de los UAS el número de drones sería bastante mayor que el de las aeronaves de la aviación actual, siendo esto un dato importante a tener en cuenta para la creación de estos sistemas. Este número tan elevado propone que el control del tráfico sea más automatizado que el del ATC existente.

#### Sistema de control de tráfico aéreo

Las propuestas para esta gestión son numerosas, sin embargo, las más potentes serían, por un lado, la de FAA y NASA [23] con la creación del UTM (*Urban Traffic Management*), y por otro SESAR [24] con su proyecto llamado U-Space. En ambos casos su implementación se haría paulatinamente, repartido en cuatro fases donde se irían desarrollando cada vez más los sistemas.

#### Comunicación, navegación y vigilancia (CNS)

Para la puesta en escena de estas comunicaciones se apostará por la implementación de nuevas tecnologías como LTE, 5G o enlaces por satélite. Sin embargo, este avance en las comunicaciones tiene aún algunos retos por afrontar: disponibilidad, precisión y seguridad de las comunicaciones.

La idea de utilizar la tecnología GPS se ha demostrado que no sería posible usarla por sí sola en un espacio aéreo urbano [25], por lo que se requerirán de otras tecnologías de apoyo para mejorar la disponibilidad y precisión como el uso de redes móviles juntamente con el GPS [26] [27].

Por otro lado, la idea de usar el ADS-B por sí solo también resulta inviable debido a la gran saturación que hay en esta banda de frecuencias, es por ello, por lo que se debería de apoyar en otras tecnologías como podría ser la del 5G [28].

**Capacidad**

La capacidad se verá muy afectada por las estructuras aéreas que se decidan finalmente implementar en este nuevo sistema de movilidad urbana, así como la rigidez que tengan las mismas. Finalmente, la causa principal que merma la capacidad es la seguridad, siendo esto la causa que prevalece sobre el resto. Por ello, aunque los comienzos de este nuevo proyecto impliquen una menor capacidad, esto muy probablemente evolucionará una vez se demuestre que se obtienen unos niveles de seguridad adecuados.

**6.2.4. Factores operacionales de la aeronave**

**Tipo de aeronave y mezcla de aeronaves**

Se deben estudiar las diferencias y similitudes entre los distintos UAS de acuerdo con su equipamiento de a bordo, dimensiones, peso, maniobrabilidad, etc. Además, se ha de analizar cómo afectarían la mezcla de distintos tipos en este nuevo espacio aéreo.

**Eficiencia energética**

La duración de las baterías eléctricas de los UAS impone una gran limitación en el transcurso de una operación. Se podrían proponer varias soluciones como utilizar las trayectorias óptimas para cada operación, pero al igual que el caso de la capacidad del sistema, la seguridad debe prevalecer sobre el resto, por lo que se prefieren utilizar trayectorias más largas, pero más seguras. Sin embargo, se tendrán en cuenta algunas medidas de optimización de eficiencia energética para el diseño de estas nuevas trayectorias. Según los autores de este estudio de estrategia de planificación de rutas teniendo en cuenta la eficiencia energética [29], se averiguó que los mejores resultados se obtenían cuando se volaba a altitudes bajas y realizando descensos y ascensos menos profundos, por ello se plantea la implementación de vertipuertos en zonas elevadas como las azoteas de los edificios.

Capítulo VII

**7. NUEVAS ESTRUCTURAS AÉREAS**

**7.1. Zonificación por alturas**

Para elaborar esta nueva propuesta, se deberá ser consciente del punto de partida del diseño. Si se revisa el espacio aéreo actual, véase ANEXO III. DEFINICIONES DEL ESPACIO AÉREO ACTUAL, está dividido en distintas clases desde la A hasta la G.



Ilustración 11.- Clases del espacio aéreo en la actualidad, fuente FAA [23]

Como se puede observar en la Ilustración 11 la zona principal donde se pueden mover los UAS libremente sería en el espacio aéreo de clase G hasta una altura de 400 ft (121,92 m). Partiendo de esta información, se ha realizado una nueva zonificación basada en distintas alturas. En cada zona podrán volar un tipo de aeronaves con unas características específicas (de dimensiones, peso, tecnología a bordo, maniobrabilidad, etc.), así como la aparición de nuevas zonas dedicadas exclusivamente para la seguridad. Estas zonas irán enumeradas desde la zona I hasta la V.

- **Zona I, zonas de UAS recreativos:** esta zona comprenderá desde 0m hasta 70m. Esta altura ha sido así elegida debido a que este diseño tendrá una futura implementación en la ciudad de Almería. Teniendo esto en cuenta, se ha investigado sobre el obstáculo de mayor altura que se encuentra dentro de la zona de estudio vista previamente, siendo este una antena de 62,67m [30].

Con el fin de definir las dimensiones de esta zona, se ha establecido una altura de seguridad con respecto a obstáculos,  $h_{seg_{obs}}$ . Para la determinación de esta altura se ha tomado como referencia la distancia vertical entre carriles calculada a lo largo de este informe. Tras una serie de cálculos se estipula que la altura vertical entre capas será de 9m, pero dado que en este caso no existiría el problema de cruces de calles, finalmente la distancia vertical sería de 6m. Por tanto, se podría decir que,  $h_{seg_{obs}} = 6 \text{ metros}$ , quedando la altura de la zona I con un resultado de 68,67m. Sin embargo, en este caso en concreto se recomendaría llegar hasta los 70 metros respecto al suelo para facilitar la estructuración del espacio aéreo superior.

En esta zona participarán todos aquellos UAS dedicados a las actividades recreativas y los cuales tengan un fin lúdico. Las características de los UAS que operen en esta zona deberán ser equitativas a un C0 y/o C1 de acuerdo con la normativa europea, además de regirse de acuerdo con la legislación vigente para este tipo de aeronaves.

- **Zona II, zona sUAS:** En esta zona se desarrollará principalmente la movilidad aérea urbana (en adelante, UAM). Constará desde los 70m de altura hasta los 150m, esta ha sido la altitud límite elegida basándose con la impuesta por SESAR en su proyecto U-Space [24]. En esta zona se encontrarán todos los sUAS con hasta MTOM < 25 kg y multirrotores, y con unas dimensiones límite que se verán posteriormente. Esta zona, así como las estructuras aéreas que la componen, estará bajo el control del UTC. Es a partir de esta zona donde el papel UTC comienza a ser fundamental para un correcto funcionamiento del sistema.
- **Zona III, zona de seguridad:** A continuación, aparecerá una zona comprendida entre los 150m y 180m de altura. Se le han dado 30m de distancia vertical a esta zona en semejanza con la propuesta hecha por Amazon para el espacio aéreo urbano [31]. Como su propio nombre indica su finalidad será salvaguardar la seguridad entre las aeronaves por ello servirá como zona de transición entre los UAS con gran diferencia de dimensiones y tecnologías. Esta podrá ser usada por el UTM para casos de emergencia o peligro para las aeronaves.
- **Zona IV, zona de PAVs y UAS con MTOM > 25kg:** La dimensión de esta zona constará desde los 180m hasta 365m siendo esta la altura elegida ya que, como se puede ver en la Ilustración 11, el espacio aéreo de clase G se expande hasta dicha altura. Además, se ha escogido este límite con el fin de evitar problemas con el resto de la aviación y así no intervenir en espacio aéreo controlado. En esta zona operarán los UAS dedicados al transporte de pasajeros o cuyo peso supere los 25kg, además deberán tener una

tecnología a bordo superior a los sUAS y con unos sistemas de “sense and avoid” bastante sofisticados capaces de realizar el vuelo de una manera más autónoma que los sUAS. En esta capa seguirá gobernando el UTM como sistema de gestión de tráfico, el cual tendrá siempre informados a todos los operadores.

- **Zona V, zona de ATM y aviación general:** Esta zona comienza a los 365m de altura sobre el terreno. En ella, el espacio aéreo se mantendrá tal y como es hasta ahora cumpliéndose por lo tanto las mismas normas de la aviación general. El vuelo de UAS en esta zona no estará permitido. En esta última zona se impondrá la gestión del ATM el cual desempeñará las mismas funciones que hasta ahora, además de mantener contacto directo con UTM para ser consciente también del tráfico en los niveles inferiores y que no se produzca ningún tipo de conflicto entre la aviación tripulada y la que no.

Como se ha podido apreciar, las zonas de mayor interés de estudio constarán desde la zona II hasta la IV, puesto que en el resto de las zonas las aeronaves operarán de acuerdo con la legislación vigente y sin ningún tipo de cambio. A continuación, se realizará un estudio más exhaustivo de las zonas destacadas.

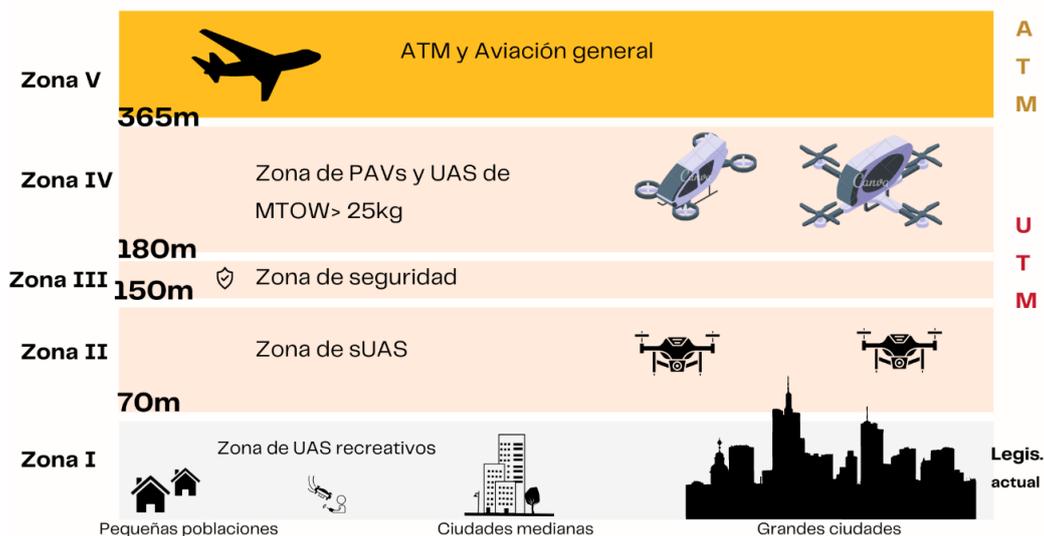


Ilustración 12.- Nueva división de zonas basada en distintas altitudes, elaboración propia

## 7.2. Zona IV. Estructuración basada en tubos

Una vez definidas las nuevas zonas por altitudes en las que consistirá el espacio aéreo, el estudio se enfocará en primer lugar en la Zona IV de PAVs (*Personal Air Vehicle*) y UAS de MTOM > 25 kg.

En esta zona se encontrará un nuevo nicho dentro de los UAS, los aerotaxis dedicados al transporte de personas. Este mercado ha resultado muy llamativo para las grandes empresas. Según la consultora Roland Berger, que ha recopilado datos sobre más de 200 proyectos de aviones de propulsión eléctrica desde 2010, los aerotaxis urbanos pasaron de formar un 40% a un 45% del total de los proyectos en 2019 [32].

Pero para conseguir su implementación, como se ha estado mencionando anteriormente, será necesario realizar varios pasos previos como el comienzo de uso de estructuras aéreas para el control del tráfico aéreo urbano, sistemas de gestión y comunicación adecuados, así como una maduración tecnológica. Esto conlleva tiempo y pruebas piloto.

Según un informe de Altran (marzo 2020), se espera que para 2025, los eVTOL (*electrical Vertical Take-off and Landing*) VIP empiecen a competir con los servicios de aerotaxi realizados por helicópteros, y que para el año 2030 comience una nueva era de la movilidad con la producción en masa de los eVTOL que ya están en desarrollo [32].

En esta propuesta de diseño de espacio aéreo para esta zona, donde volarán aeronaves con un peso bastante considerable y una tecnología a bordo desarrollada, se ha apostado por la utilización de estructuras basadas en tubos.

Estos tubos serán estructuras de forma cilíndrica donde convivirán varios tipos de aeronaves, pero, gracias a su capacidad para realizar vuelos de manera más autónoma y pudiendo corregir su trayectoria en caso de desviación por cualquiera causa, se les permitirá un vuelo en doble sentido dentro del tubo sin tener en su interior unos carriles perfectamente delimitados. Por supuesto, dentro de la zona IV podrán coexistir varios tubos con los que se cree una nueva red de transporte. Esta flexibilidad que tienen estas estructuras hace que el rendimiento del sistema mejore, así como su propia capacidad, salvaguardando siempre unos mínimos de seguridad.

Las reglas de vuelo que se aplicarán en estos tubos se basarán en las Reglas de Aire actuales definidas por el Anexo 2 al Convenio de Chicago de OACI, o bien por el SERA en el caso de que se tratase de espacio aéreo de la UE.

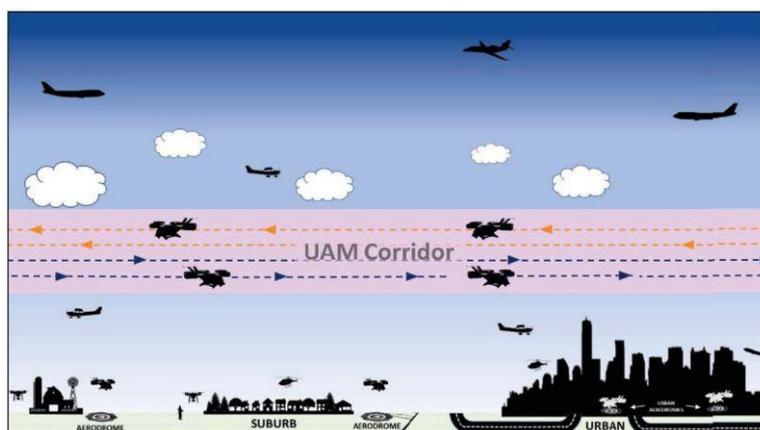


Ilustración 13.- Tubo de vuelo mostrando el doble sentido de la estructura, fuente [23]

Gracias a estas estructuras se podrán comunicar distintos núcleos poblacionales sin importar su extensión. Sin embargo, el lugar de despegue y/o aterrizaje deberá disponer de una infraestructura adecuada para la incorporación y salida a estos tubos. Por ello será necesaria, por parte del núcleo poblacional, la presencia de vertipuertos en los que estas aeronaves puedan iniciar o finalizar sus operaciones.

La conexión entre los tubos de la zona de vuelo y los vertipuertos se realizará a través de tubos dedicados exclusivamente a la entrada y salida de aeronaves, los cuales recibirán el nombre de “tubos afluentes”.

En estos tubos afluentes el control lo tendrá íntegramente UTC y no será hasta que la aeronave esté incorporada completamente con el resto cuando comience con su autonomía de movimiento. Siendo así el papel del UTC, desde el momento de despegue hasta la incorporación al tubo, crucial. Esto será así de igual manera para la operación contraria, es decir el aterrizaje, el UTC comenzará a intervenir desde el momento que la aeronave se incorpora en el tubo afluente hasta su finalización del vuelo en el vertipuerto. Justo en los momentos de

incorporación al tubo de vuelo o al vertipuerto, según proceda, aparecerán los llamados “puntos de contingencia” de los cuales no se podrá salir o entrar salvo autorización por parte del UTC. Con esto se pretende evitar conflictos con el resto de las aeronaves y se tendrá un mayor control del flujo del tráfico en estas estructuras.

En cuanto a los tubos que se encuentran íntegramente en la zona IV, también llamados como “tubos de vuelo”, el UTM tendrá también en ellos una serie de responsabilidades como aportar información a todos los operadores sobre la meteorología, ajustes dinámicos del sistema, gestión de las trayectorias y puntos de contingencia, autenticación de aeronaves, geoconsciencia de todos los operadores, entre otras.

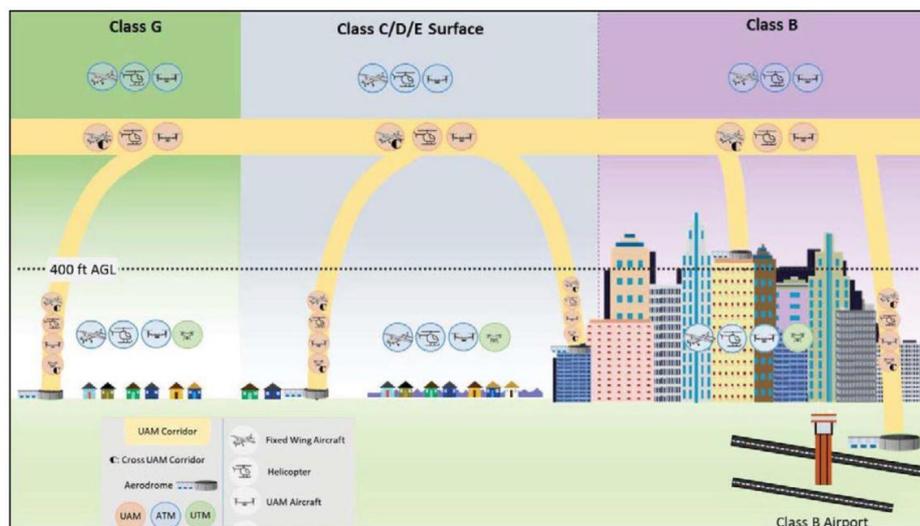


Ilustración 14.- Estructura aérea basada en tubos aplicada en la zona IV, fuente [23]

### 7.3. Zona III. Zona de seguridad

Esta zona consiste en 30m verticales que, como su propio nombre indica, su finalidad es mantener la seguridad de las operaciones. Esta zona podrá ser utilizada solo cuando el UTC autorice a una aeronave para hacerlo, servirá como “apartaderos” donde las aeronaves puedan quedar en espera con el fin de resolver un conflicto del tráfico del resto de zonas.

Además, como se ha mencionado con anterioridad, esta zona marca la separación entre UAS con dimensiones y tecnologías bastantes distintas. Por ello, es también importante para definir de manera bastante clara su separación.

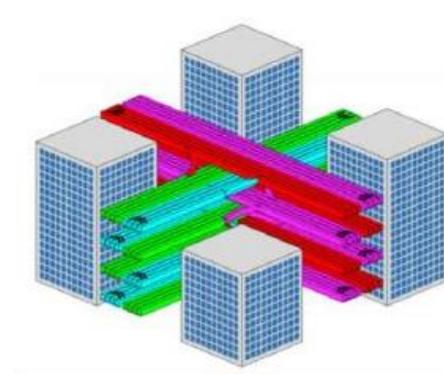
### 7.4. Zona II. Zona de sUAS

Esta zona tomará gran importancia, puesto que serán objeto de estudio en profundidad sus estructuras aéreas. Es en ella donde se llevará a cabo el tráfico aéreo urbano, es decir, las aeronaves ocuparán los cielos de las ciudades y sobrevolarán las calles. Esto será así solo para los sUAS (*small UAS*) por lo que sus dimensiones no excederán unas ciertas medidas y pesos, pero esto no quita que no dispongan de una tecnología a bordo de importancia dotándolos de las capacidades para poder seguir un tráfico controlado. Gracias a la aparición de esta nueva movilidad, los beneficios que puede aportar a estos entornos urbanos son, según un estudio realizado por EASA [33], la reducción del tiempo para la asistencia a emergencias en un 71%, la reducción de atascos en un 51%, la disminución de la contaminación por el uso de combustibles fósiles en el transporte en un 48%, y el aumento de hasta un 41% en la posibilidad de un mayor desarrollo para regiones aisladas o remotas. Viendo los beneficios que pueden llegar a aportar,

así como el interés que ha despertado, es de vital importancia que la implementación de esta movilidad sea más temprana que tardía.

La estructuración de esta zona se basará en un sistema de “capas”, teniendo a su vez en su interior conjuntos de “carriles” los cuales determinarán la trayectoria exacta que deberán de seguir los UAS.

En primer lugar, se realizará un análisis de la nueva estructura denominada como “capa”. Una capa consistirá en una estructura con forma rectangular cuyas dimensiones están aún por definir. Estas se situarán encima de las calles ya existentes en la ciudad, siguiendo los patrones urbanos ya existentes en tierra. Se podría dar la posibilidad de que algunas de las calles no sean aptas para este tipo de movilidad debido a sus dimensiones.



*Ilustración 15.- Resultado de la implementación de capas en un ambiente urbano, fuente [34]*

A continuación, se especificarán los requisitos por los que se regirá el siguiente sistema de capas:

- Las distintas capas se situarán unas justo encima de otras, marcando cada una de ellas un distinto nivel de vuelo.
- Dentro de una misma capa solo podrán operar sUAS de características muy similares (tecnología a bordo, dimensiones, pesos, autonomía, etc.).
- Es por ello por lo que a cada sUAS dependiendo de sus propiedades, se le asignará una capa y no será posible realizar un cambio.
- Las capas quedarán siempre bajo el control del UTM, el cual mantendrá una comunicación constante con el operador y aportará información como la meteorología, ajustes dinámicos del sistema, gestión de las trayectorias y puntos de contingencia, autenticación de aeronaves y geoconsciencia de todos los operadores, entre otras.
- El operador también tendrá un papel fundamental en este tipo de estructuras más rígidas, ya que asumirá más responsabilidades en comparación con el resto de las zonas del sistema, dado que la aeronave no dispondrá de tecnología tan desarrollada como para ser suficientemente autónoma en la toma de decisiones.
- La incorporación y salida a cada una de estas capas se realizará en un vertipuerto, donde el UTC dará permiso para el comienzo o finalización de cada operación.

Como se ha mencionado, estas capas están formadas por conjuntos de carriles, pero para comprender mejor estas estructuras se va a definir qué se entiende por “carril”.

Un carril se podría definir como una trayectoria predeterminada que los sUAS deberán seguir para realizar una operación en un ambiente urbano. Al conjunto de carriles con un mismo sentido del tráfico se les denominará como “banda”.

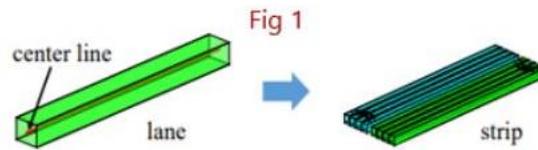


Ilustración 16.- Estructura de un carril y una banda de carriles, fuente [35]

Dentro de una misma capa habrá principalmente dos bandas de carriles con sentidos contrarios. Los carriles que tengan un mismo sentido tendrán una distancia menor que la existente entre los carriles de distintos sentidos. Esto es así con el fin de mejorar la seguridad de las operaciones y del sistema.

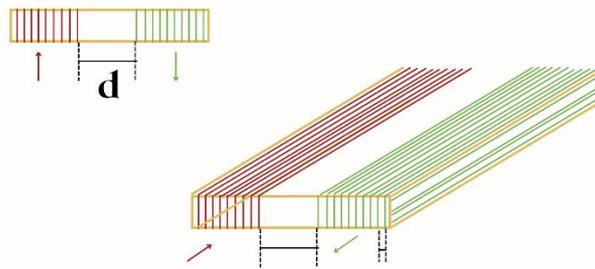


Ilustración 17.- Distancias a calcular de la estructura “capa”, elaboración propia

Posteriormente se realizará un estudio analítico sobre esta estructura aérea y las dimensiones de la misma. Una vez se conozcan, así como sus distancias de seguridad, se podrá conocer la distancia vertical que deberá existir entre las distintas capas y por lo tanto entre los distintos niveles de vuelo.

Una vez conocida la estructuración de esta zona, se definirá la distribución de sUAS en las distintas capas.

Con el fin de aplicar una medida de mitigación ante el riesgo del sobrevuelo los sUAV sobre zonas urbanas, se pronpodrá la incorporación de un sistema de paracaídas para que en casos de caída no suponga un riesgo mortal para la población. Realizando una estimación de la energía con la que impactaría el UAV de mayor tamaño del sistema, en este caso el modelo Wingcopter 178 Heavy Lift A (Delivery Variant) [36], desde la altura máxima de vuelo de la zona II, es decir 150 m, y aplicando la formulación de la energía potencial:

$$\begin{aligned}
 E_{potencial} &= m \cdot g \cdot h = (8,4 \text{ kg}_{empty} + 6 \text{ kg}_{payload}) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 150m \\
 &= 21\ 189,6 \text{ J} \approx 21\ 200 \text{ J}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Se obtendría que la energía de impacto de esta aeronave sería aproximadamente de unos 21200 julios. Teniendo en cuenta que de acuerdo con el siguiente informe de Cajal F. J. [37] el impacto máximo que puede recibir una cabeza para que no sea mortal es de 10 J sin casco y hasta 175 J

con él, definitivamente se considera la aplicación de esta medida de mitigación como indispensable.

Para los casos de sUAVs de MTOW<2kg, de acuerdo con la fuente [38], si que existen paracaídas con una tasa de éxito para su apertura del 90,6% en alturas de vuelo de 60m y mayor del 96% para alturas de 100m. Dado que la zona II de estudio comienza en una altura de 70m, se podría concluir que en esta zona la tasa de éxito de apertura de un paracaídas sería superior al 91% para este tipo de aeronaves. Por lo que, finalmente dada la tasa de éxito para los UAV de MTOW<2KG, los UAV de mayor tamaño se encontrarán en las capas superiores ya que un paracaídas grande tardará más en desplegarse.

Con el fin de afrontar la problemática de la UAM (*Urban Air Mobility*), en esta propuesta se ha optado por la estructuración en capas debido a sus múltiples beneficios en relación con la seguridad. De acuerdo con el estudio [39] se ha demostrado que las capas reducen la probabilidad de colisión hasta en tres formas diferentes.

- ✓ Creación de distancias verticales entre operaciones.
- ✓ Segregación de operaciones de acuerdo con la dirección de vuelo, reduciéndose así el número de puntos de conflicto.
- ✓ Separación de aeronaves de acuerdo a su tecnología y capacidades.

Asimismo, con estas capas se sigue dando un rendimiento adecuado en términos de capacidad e inclusividad al sistema. Así pues, el sistema es capaz de albergar un amplio abanico de distintos modelos de UAS con diversas tecnologías a bordo.

Una vez estudiadas las zonas de este nuevo diseño de espacio aéreo, es notoria la diferencia entre las zonas II y IV. En esta zona II, la estructuración es mucho mayor en comparación con la IV, así como el control sobre las aeronaves. Esto se debe principalmente a la diferencia tecnológica que existe entre los UAS utilizados en cada zona. Esta estructuración tan rígida puede ser beneficiosa en términos de separación de tráfico, seguridad e inclusividad de aeronaves, aunque, por otro lado, reduce el rendimiento del sistema. Teniendo en cuenta el estado en el que se encuentran las tecnologías tanto de UAS, como de comunicación, navegación, etc., se considera la imposición de estructuras y segregación entre operaciones y aeronaves la manera más razonable de que sea posible la integración de una movilidad aérea urbana en un futuro temprano. Con el paso del tiempo y una maduración del sistema se podría plantear la desaparición de algunas limitaciones o estructuras impuestas en estas primeras fases.

### 7.5. Vertipuertos

Una vez vistas las distintas partes de las que se compondrá el sistema, es notoria la falta de una pieza fundamental del rompecabezas, los vertipuertos. Estos serán plataformas utilizadas por los vehículos aéreos, especialmente eléctricos, para el despegue y aterrizaje vertical [40]. Pero estas infraestructuras no solo constarán de la plataforma en sí, si no que se compondrán por varios edificios donde se les dará servicio a múltiples necesidades que surgen a partir de esta nueva movilidad aérea. Se podrán encontrar áreas de estacionamiento de UAS, un hangar donde se podrán realizar distintas tareas de mantenimiento, edificios conectados con la plataforma de operaciones donde se encontrará el equipo técnico asociado (como la infraestructura de carga y logística o la terminal de pasajeros), así como edificios independientes que formarán parte de esta cadena de transporte de mercancías y pasajeros.

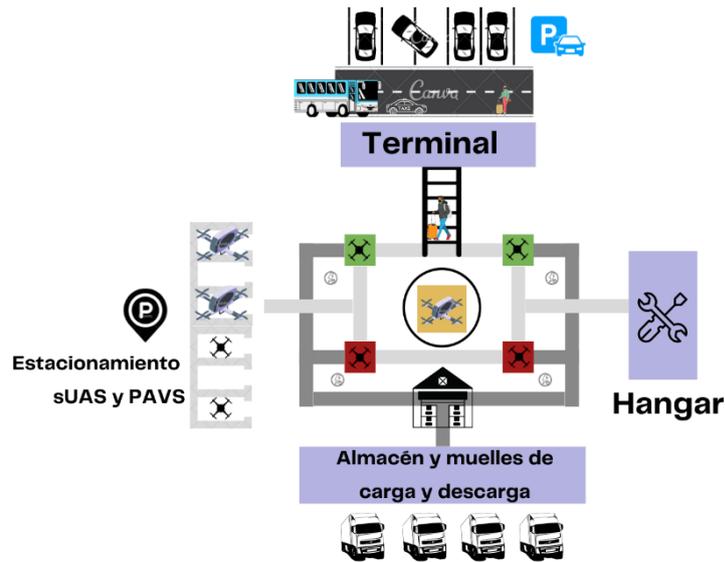


Ilustración 18.- Instalaciones por las que se compondrá un vertipuerto, elaboración propia

### 7.5.1. Incorporación de los vertipuertos con el resto de las estructuras del sistema

Los vertipuertos podrán hallarse en dos tipos de emplazamientos:

- Vertipuertos de superficie, los cuales se encontrarán emplazados en tierra.
- Vertipuertos elevados, los cuales se situarán sobre una estructura terrestre elevada siempre y cuando la extensión de dicha plataforma pueda albergarlo.

Es así como estas infraestructuras partirán desde la zona I hasta la zona IV, alcanzando de esta manera una altura de 180m. En la zona II donde se desarrollará la UAM, se encontrarán las ya vistas estructuras de capas y carriles.

A continuación, se mostrará de manera gráfica cómo se integrarán dichas estructuras con la zona de seguridad del vertipuerto.

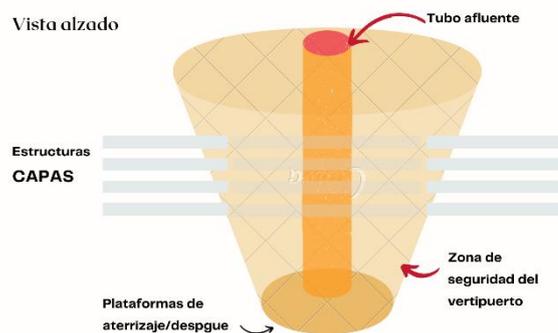


Ilustración 19.- Vista en alzado de la intersección del vertipuerto con el resto de las estructuras aéreas, elaboración propia

Como se puede observar, se le ha dotado a la zona de seguridad del vertipuerto con una forma troncocónica en cuya base se encontrará la plataforma de operaciones. En su interior albergará

la estructura aérea de tubo afluente, ya vista en el apartado 7.2, que conectará la superficie terrestre con la zona IV de vuelo y donde se llevará a cabo el movimiento de pasajeros.

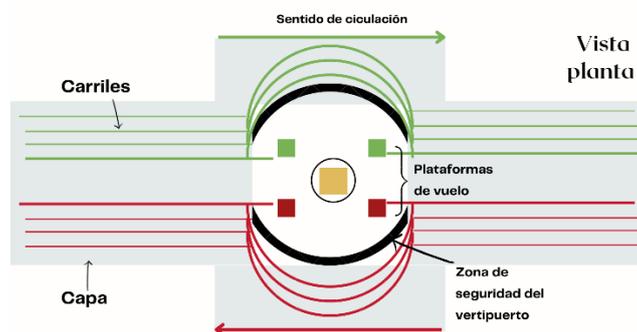


Ilustración 20.- Vista en planta de la intersección del vertipuerto con el resto de las estructuras aéreas, elaboración propia

En esta otra vista en planta se puede apreciar mejor la intersección de las capas y carriles con la zona de seguridad del vertipuerto. Destaca como los carriles que no desembocan en esta instalación rodean su zona de seguridad y continúan con su recorrido. Sin embargo, los cuatro carriles que confluyen en ella se utilizarán para realizar operaciones de aterrizaje y despegue de las aeronaves.

### 7.5.2. Zona de operaciones

Para poder hablar más en profundidad de estas maniobras, se deberá conocer más en detalle la zona de operaciones propuesta para las infraestructuras de vertipuertos. Sin embargo, se hará una diferenciación previa entre los términos zona y plataforma de operaciones definiéndose cada una de ellas.

- **Plataforma de operaciones.** Se trata de la superficie en las que se encuentran las bases de vuelo, así como sus cintas de movimiento.
- **Zona de operaciones.** Se refiere al espacio tanto en aire como en tierra que abarca la zona de seguridad del vertipuerto.

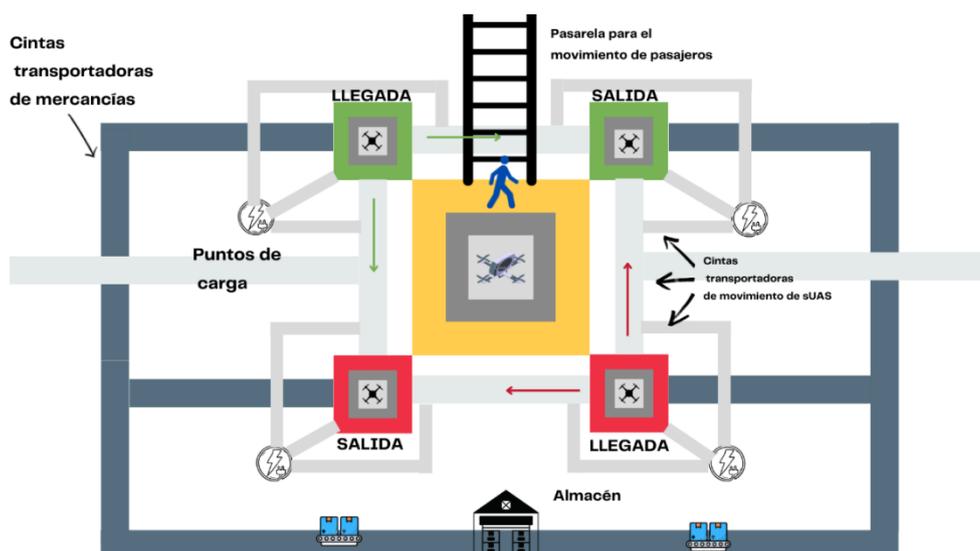


Ilustración 21.- Vista en planta de la plataforma de operaciones, elaboración propia

Como se muestra en la Ilustración 21, la plataforma de operaciones estará compuesta principalmente por 4 bases dedicadas a sUAS, y una base central dedicada a los PAVs o UAS de MTOW > 25kg. Las bases están diferenciadas por colores de acuerdo con los dos sentidos de circulación de los carriles. Además de las operaciones de vuelo, existirán unos servicios extra a los que se les hará mención en este capítulo, pero para poder acceder a ellos existirán hasta 3 estructuras diferentes para el movimiento dentro de la plataforma de operaciones.

- **Cintas transportadoras de movimiento de sUAS**, estas consistirán en cintas que como su propio nombre indican serán usadas exclusivamente por las aeronaves. Estas pueden desembocar en otra base o en un punto de carga dependiendo de la necesidad que tenga en ese momento la aeronave. Estas cintas tendrán siempre un único sentido y ya definido.
- **Cintas transportadoras de mercancías**, de nuevo como su propio nombre indican estas cintas tienen un uso solo para mercancías. Todas ellas desembocarán en un mismo almacén donde se realizarán los transbordos de paquetes. En este caso las cintas sí que tendrán un doble sentido y se moverán de acuerdo con como sea indicado desde almacén.

Estos casos de movimiento deberán ser siempre auxiliados por operarios que se encargarán de cargar y descargar dichas cintas.

- **Pasarela para el movimiento de pasajeros**, esta estructura albergará el paso de los pasajeros desde la terminal hasta el eVTOL. Estará siempre supervisado por el personal autorizado que permitirá el paso de pasajeros hacia o desde las aeronaves.

#### Dimensionamiento de la plataforma de operaciones

En este apartado se le dará paso al estudio de las dimensiones que deberán de tener las bases que componen la ya mostrada plataforma de operaciones, pero, para ello, se han de conocer las partes de las que se componen.

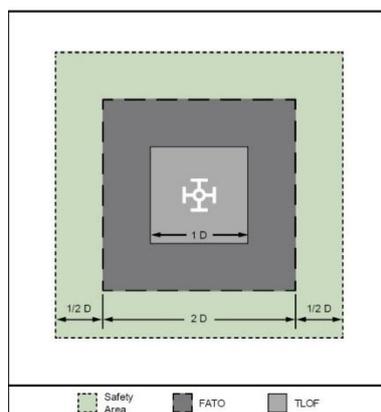


Ilustración 22.- Partes por las que se conformará una base de vuelo de acuerdo con FAA [40]

Si se analiza esta figura desde el interior hacia el exterior, la zona señalada en gris claro hace referencia al TLOF, es decir, al área de toma de contacto y elevación inicial. Seguidamente se encuentra la zona marcada en gris oscuro, refiriéndose a la FATO o área de aproximación final y de despegue y, por último, la zona señalada en verde, el área de seguridad. La base tendrá una forma cuadrada por lo que su anchura y altura tendrán siempre el mismo valor.

El dimensionamiento de todas las bases ha sido de acuerdo con el informe de ingeniería de la FAA sobre el diseño de vertipuertos [40].

Por un lado, se estudiará la plataforma para los PAVs, en el cual se desarrollará el transporte de pasajeros. A las aeronaves dedicadas a este transporte también recibirán el nombre de VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Para este dimensionamiento, tras investigar varios modelos de aeronaves, finalmente se ha escogido como VTOL de referencia al VC200 de la empresa Volocopter, puesto que sus dimensiones son las mayores encontradas hasta ahora en el mercado. Tiene capacidad para hasta 2 pasajeros, un MTOM de 450 kg y está propulsado por 18 rotores los cuales forman un diámetro de plano motor de 7,60 metros [42].

Teniendo esto en consideración, se ha aproximado el diámetro de referencia hasta 8 metros, ya que este diámetro sería el que restringiría en mayor manera el dimensionamiento de estas bases. Siendo por tanto la anchura/altura de TOLF de 8 metros, el doble de FATO por lo que tendría 16m y 4 metros a cada lado de la FATO como área de seguridad. Haciendo esto un total de 576 m<sup>2</sup> (24m de ancho x 24m de alto) de superficie de base de PAVs.

A continuación, se aplicará el mismo criterio para el dimensionamiento de las bases de sUAS. De nuevo, tras investigar distintos modelos de sUAS en el mercado actual, se ha tratado de encontrar el de mayores dimensiones puesto es el que limitará las dimensiones de las bases.

Finalmente se ha optado por el modelo Wingcopter 178 Heavy Lift A (Delivery Variant) con un diámetro equivalente de 1,78 metros [36]. Con el fin de dar una tolerancia de seguridad y así garantizar en mayor manera que ninguna aeronave exceda estas medidas, se aproximará como diámetro de referencia para la realización de las bases de  $D_{base} = 2m$ . Por lo que el resultado final quedaría con un TOLF de 2 metros de alto/ancho, una FATO de 4m y dejando una distancia para el área de seguridad de 1m a cada lado de la FATO. Dando esto un área total de 36 m<sup>2</sup> (6m de ancho x 6m de altura).

Como ya se ha mencionado, estas cuatro bases de sUAS están conectadas entre sí por unas cintas transportadoras cuyo uso será exclusivo para el movimiento de aeronaves. La ventaja que presenta este sistema frente a unas rutas de rodaje aéreas será el ahorro de batería y autonomía por parte de los sUAS.

Tras conocer las dimensiones necesarias para ambos tipos de bases, se podría realizar una aproximación de la dimensión total que debería de tener plataforma de operaciones del vertipuerto, quedando pues un resultado parecido a lo mostrado en la Ilustración 23.

Tras realizar la sumatoria total de cotas se puede observar como el resultado a cada lado es de un total de 36 m, dando así a un área total de 1296m<sup>2</sup>.

Cabe señalar que este dimensionamiento queda sujeto a modificaciones, ya que dependerá en gran medida de la operativa de las aeronaves. Hay una alta probabilidad de que se disminuyan estas primeras medidas propuestas suponiendo esto un aumento de la capacidad de estas estructuras ya que se podrán crear nuevas bases de operación.

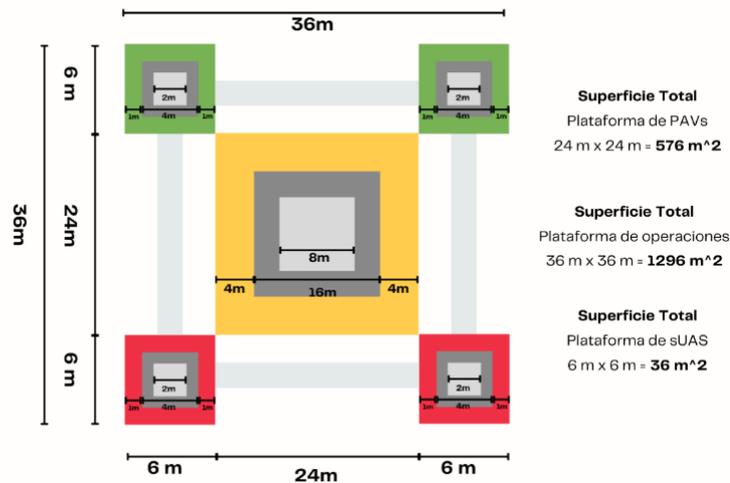


Ilustración 23.- Plataforma de operaciones simplificada, acotada y cálculo de superficies totales, elaboración propia

Dado que a la zona de seguridad de vertipuerto se le ha dado una forma troncocónica y la base que se acaba de calcular tiene una forma cuadrada, habrá que averiguar qué diámetro deberá tener la base inferior de este tronco de cono. Para ello se deberá conocer la equivalencia entre las áreas del cuadrado y el círculo:

$$L \cdot L = \pi \cdot \frac{D_{base}^2}{4} \quad (2)$$

Por lo que, si se despeja la  $D_{base}$  y se sustituyen valores, se conocerán finalmente el valor del diámetro de dicha base, teniendo finalmente un valor de 40,62 metros.

$$D_{base} = \sqrt{\frac{4 \cdot (L \cdot L)}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (36 \cdot 36)}{\pi}} = 40,62m \quad (3)$$

La superficie lateral de dicho tronco de cono deberá de tener una inclinación de  $\alpha$ . A esta incógnita se le podrá dar un valor aproximado una vez se haya realizado un estudio más profundo sobre la mecánica de vuelo de los *small UAS* y su comportamiento en las operaciones de despegue y aterrizaje.

Para calcular la inclinación de dicha superficie lateral, previamente habrá que definir el radio de la base superior y será entonces cuando la geometría del área de seguridad podrá quedar perfectamente definida, ya que la altura total es conocida.

### Modo de operación sUAS

Una vez explicadas las partes fundamentales de las que se comprenderá el vertipuerto se procederá a evaluar la operativa de los sUAS para la llegada y salida a estas bases.



Ilustración 24.- Vista en alzado del aterrizaje de un sUAS, elaboración propia

Para realizar un aterrizaje en una base de llegada, los drones deberán mantener un vuelo sostenido en el llamado “punto de espera”, situado justo antes de la zona de seguridad del vertipuerto, y no podrán acceder a ella hasta que sea autorizado por el UTC. Una vez sean autorizados a entrar deberán de situarse de manera perpendicular sobre su correspondiente base de llegada y realizar un descenso vertical sobre ella. Ya en la plataforma, en el caso de llevar mercancías deberán de dejarlas, y en caso de estar en un nivel bajo de batería deberán de dirigirse a su punto de carga correspondiente, pero esto se explicará más detalladamente a continuación.

En cuanto a la acción de despegue, el sUAS deberá de dirigirse por medio de las cintas transportadoras de movimiento y/o con ayuda de un operario a la base de salida correspondiente, la cual dependerá del sentido de circulación al que se quiera reincorporar. Una vez situado en la base de salida, será el UTC quien le dé permiso a la aeronave para realizar el despegue e incorporación a su correspondiente capa.

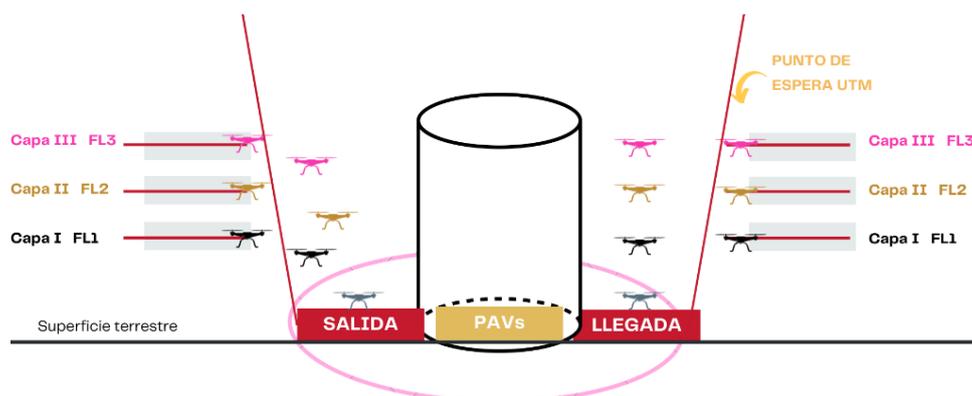


Ilustración 25.- Vista genérica del aterrizaje y despegue de sUAS en un vertipuerto, elaboración propia

A continuación, se pondrá un ejemplo de cómo podría operar una aeronave en este tipo de infraestructuras usando como base la Ilustración 26. Por ejemplo, un sUAS podría llegar a través de la capa III y tras la autorización del UTC aterrizar en la base de llegada (4), además de realizar sus correspondientes tareas (como entregar mercancías y recarga de baterías), se podrá dirigir



### Movimiento de pasajeros

Finalmente, en lo relativo al movimiento de pasajeros, se ha decidido que sean ellos mismos los que puedan acceder a través de pasarelas hasta la propia base. Solo podrán acceder a dichas pasarelas bajo la autorización del personal allí encargado, el cual, a su vez, estará coordinado por el UTC. Este personal se encargará de la salida y entrada de pasajeros, así como de la correcta apertura y cierre del VTOL después cada operación.

Se dispondrá en las instalaciones del vertipuerto de una terminal para la atención y acceso a los pasajeros. Es aquí donde se desarrollarán todas las actividades en lo relativo a la comprobación de documentación, equipajes, seguridad, etc. Además, se dispondrá de servicio de aparcamiento de coches, así como servicios de taxis y buses, dándole así continuidad a la cadena de transportes de pasajeros.

### 7.5.3. Vertipads

A partir de las infraestructuras de los vertipuertos, nace el término de vertipad. Esto realmente consistirá en una simplificación de lo ya mostrado. En estas plataformas solo habrá capacidad para la operación de un solo sUAS, por lo tanto, constará de una sola base de llegada y salida.

El dimensionamiento de estas superficies podría verse reducido con respecto al criterio utilizado en los vertipuertos, ya que el espacio disponible se encuentra más limitado. Para este caso, se ha recurrido al criterio utilizado por el Anexo 14 de OACI [43], en la norma 3.1.25, donde se especifica que, para helipuertos elevados, la dimensión mínima será igual 1D con respecto a la aeronave de mayor tamaño que espera albergar. Por lo que, para el caso de los sUAS de transporte de mercancías, como se ha visto con anterioridad, el diámetro máximo sería de 1,78m pudiéndose así aproximar una dimensión del vertipad de 2x2m, es decir, una superficie total de 4m<sup>2</sup>.

Junto a esta única base, estará un pequeño almacén encargado de las mercancías y un punto de carga de emergencia, unidos todos ellos por sus correspondientes cintas transportadoras de movimiento.

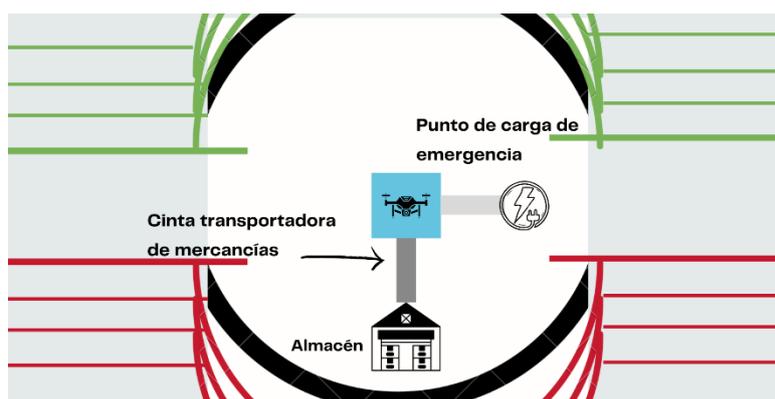


Ilustración 27.- Vista en planta plataforma de vuelo vertipad, elaboración propia

Estas estructuras se encontrarán situadas en las azoteas de los edificios, dando así la posibilidad a los centros urbanos de disponer de puntos de descarga y recogida de paquetería.

Las operaciones que se llevarán a cabo aquí tendrán un carácter “expres”, por lo que solo se podrá acceder al punto de carga en caso de emergencia no como una actividad ordinaria. En estas estructuras el único y principal objetivo es mejorar el transporte de mercancías en

ambientes urbanos, descongestionando así el tráfico de las grandes ciudades y disminuyendo los tiempos de entrega.

#### 7.5.4. Vertihubs

De la existencia de los vertipuertos y vertipads surge este nuevo concepto denominado como “Vertihub”. Estará comprendido por al menos dos vertipuertos y/o vertipads y se tratará de la estructura de mayor envergadura en el entorno UAM dándose por tanto en regiones con una gran densidad de tráfico.



Ilustración 28.- Visión general del concepto Vertihub [44]

En conclusión, tras el estudio de esta nueva estructura propuesta y todos los sectores que puede llegar a abarcar, se podría decir que los vertipuertos representan una oportunidad para desarrollar servicios interconectados integrando de forma sostenible la energía disponible y el transporte en las zonas urbanas.

### Capítulo VIII

## 8. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO EN LA CIUDAD DE ALMERÍA PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

Siendo ya conocidas todas las estructuras de las que se conformará el nuevo diseño propuesto para el espacio aéreo urbano, se pasará a su modo de implementación en la ciudad de Almería.

Como se ha comprobado anteriormente en los capítulos 3 y 4 de acuerdo con el estado actual de espacio aéreo para los UAS, la incorporación de este nuevo diseño se ha convertido en una materia necesaria para el futuro de este sector.

### 8.1. Nueva zona de estudio

Esta propuesta se enfocará en el transporte de mercancías, implicando esto que las zonas principales de estudio a partir de ahora constarán desde las ya mostradas Zonas I, II y III, dejando a un lado el movimiento de pasajeros y todo lo que esto conlleva como las estructuras basadas en tubos, etc.

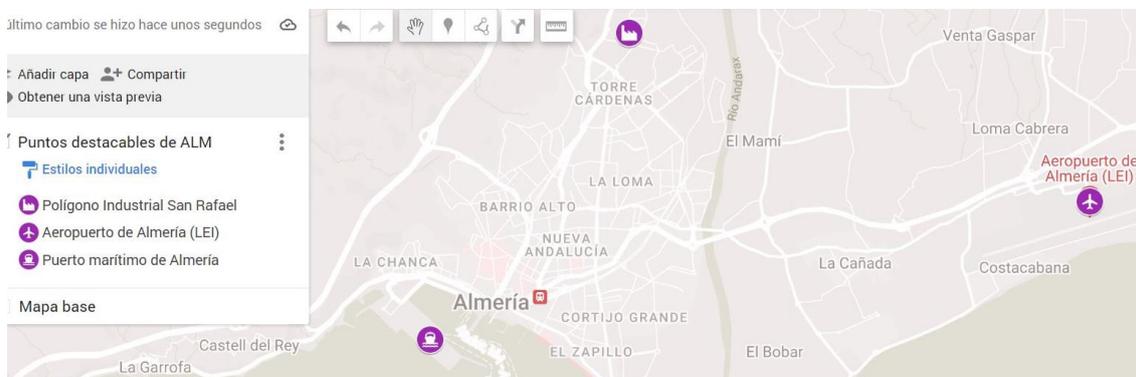
Como ya se referenció, los límites dichas zonas se hicieron de acuerdo con el obstáculo de mayor altura de esta ciudad, por lo que dependiendo de la ciudad en el que se vaya a implementar este diseño estos límites podrán variar.

Sin embargo, con el fin de generalizar el estudio, se podría consolidar el siguiente criterio de diseño para establecer las dimensiones de la Zona II

$$h_{ZonaII} \geq h_{obs_{mayor}} + h_{seg_{obs}} \text{ (redondeando a la decena)}$$

Para comenzar a adaptar el diseño a la ciudad, en primer lugar, se buscarán los puntos de mayor relevancia en cuanto al transporte de mercancías se trata, ya que se serán las piedras angulares sobre las que girará el resto del proyecto.

Tras analizar la geografía de la ciudad y las localizaciones de grandes infraestructuras tales como son el aeropuerto y puerto marítimo, se ha decidido remarcar las siguientes tres ubicaciones

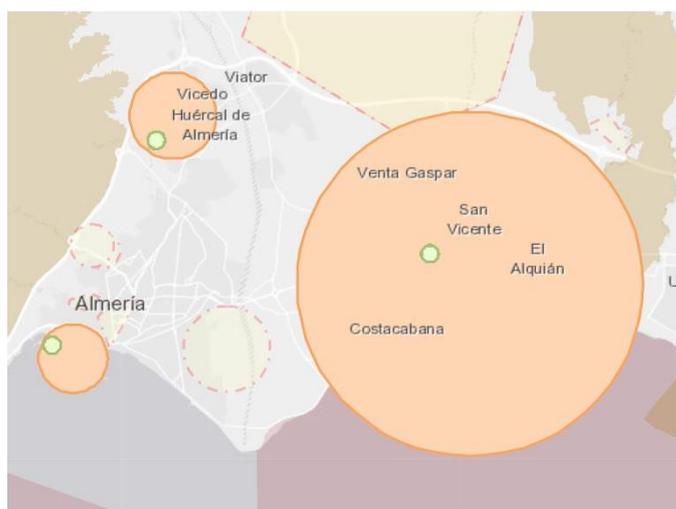


*Ilustración 29.- Tres ubicaciones de relevancia de la geografía almeriense para el transporte de mercancías, elaboración propia con MyMaps de Google*

Como se puede apreciar, estas tres ubicaciones forman un triángulo cubriendo la parte este, oeste y norte de la ciudad, además de abarcar prácticamente los mayores núcleos poblacionales de esta área.

Pero la principal razón por las que han sido elegidos estos puntos es por su interés a nivel mercantil, ya que crean una perfecta armonía en la cadena del movimiento de mercancías unificando en mayor manera el transporte terrestre, marítimo y aéreo.

A cada una de estas ubicaciones se le ha dotado de una zona de seguridad propia, como se muestra en la siguiente ilustración señaladas en color naranja.



*Ilustración 30.- Zonas de seguridad (marcados en naranja) y vertipuertos (marcados en verde) de los tres puntos clave, elaboración propia con la app de Enaire*

La zona de mayor tamaño y más llamativa es, por supuesto, la que alberga al aeropuerto. La zona de seguridad de acuerdo con la normativa actual, como se puede comprobar en el capítulo 5 de este informe, es una circunferencia de un radio de 8 km. Sin embargo, en esta nueva

propuesta se ha optado por dotar a esta zona de un radio de 4 km, es decir disminuyendo la distancia vigente en un 50%. Esto se ha decidido así con el fin de darle una mayor extensión de campo de vuelo a este tipo de aeronaves en la ciudad de Almería y pudiendo así optar a una mayor flexibilidad en las rutas a tomar o crear en un futuro. Otra consideración a tener en cuenta es que en estas zonas de seguridad no se podrá volar a más de 150m de altura, es por ello por lo que, aunque haya disminuido el radio de seguridad con el aeropuerto, como los sUAS no superarán dicho nivel de vuelo no se deberían de crear demasiados de conflictos con el resto de la aviación.

Sin embargo, se ha de puntualizar que, a pesar de reducir la zona de seguridad ligada al aeropuerto, sí que se seguirá manteniendo las dimensiones del área de superficie y aproximación de pista actualmente utilizado de acuerdo con las políticas aeroportuarias actuales [45]. Esto es así ya que en dichas áreas la aviación general sí que vuela a alturas inferiores a 150 m pudiendo crear esto conflictos entre aeronaves. Para evitar esto, el área ocupada por dichas servidumbres será prohibida para los UAS. A continuación, se mostrará en azul dicho espacio prohibido mostrando así de manera más clara el espacio finalmente disponible para los UAS.



*Ilustración 31.- Área y superficie de aproximación del aeropuerto de Almería donde el vuelo de UAS queda totalmente prohibido, elaboración propia*

En cuanto al área de seguridad del Polígono Industrial de San Rafael, el cual se conforma por un conjunto de naves industriales fabricadas con chapas y otros materiales metálicos, se pueden considerar por tanto grandes estructuras metálicas, por lo que se le ha dado una distancia de seguridad de 1000m. Esto es así, debido a que, de acuerdo con Riga Freeport [46], las grandes estructuras metálicas pueden crear interrupciones locales en las funciones de navegación de las aeronaves no tripuladas y la capacidad operativa en las proximidades.

Por último, se tratará el área de seguridad del puerto marítimo se le dado un radio de 800m. Esta ha sido la distancia elegida, ya que se trata de la distancia aproximada entre el centro del muelle del puerto con la carretera nacional N-340a. La importancia de esta zona de seguridad surge en cierta medida por el riesgo de la caída de una aeronave al agua, así como de la existencia de grandes estructuras metálicas como podrían ser los barcos cargueros y los contenedores metálicos que portan.

Estas zonas de seguridad al final han sido creadas para salvaguardar a los sUAS de ciertos peligros que puedan surgir como el caso de las grandes estructuras metálicas, el resto de la aviación, entre otros, por lo que habrá que regirse en esta zona por una serie de requisitos.

- No se permitirá volar a más de 150m.

- Solo se permiten trayectorias de salida y llegada al vertipuerto.
- Prohibición del vuelo recreativo.
- Trayectorias controladas por UTC.

## 8.2. Disposición de vertipuertos en la nueva zona de estudio

Una vez queda acotada la nueva zona de estudio, se pasará a la implementación del nuevo diseño aéreo propuesto en ella. Para comenzar con esta tarea, se posicionarán en primer lugar las estructuras de los vertipuertos, siendo estos los puntos de partida de las operaciones a realizar por los sUAS.

Como se ha señalado en el apartado anterior, hay tres puntos claves en esta área sobre los que se regirá el diseño. Siendo por tanto cada una de estas ubicaciones los lugares elegidos para la implementación de los vertipuertos.

Si se reanaliza la Ilustración 30, se encuentran señaladas en verde las zonas de seguridad de estas estructuras. Se ha de recordar que en este caso las zonas de seguridad tienen una forma troncocónica.

Para estipular el radio de la base superior, se ha tenido en cuenta que el despegue y aterrizaje de los PAVs será vertical hasta los 150 metros de altura en el inicio de la zona de seguridad. Sin embargo, una vez ya en la zona III (150-180m) se producirá un ascenso con una inclinación de  $10^\circ \pm 3^\circ$  de acuerdo con el estudio [47].

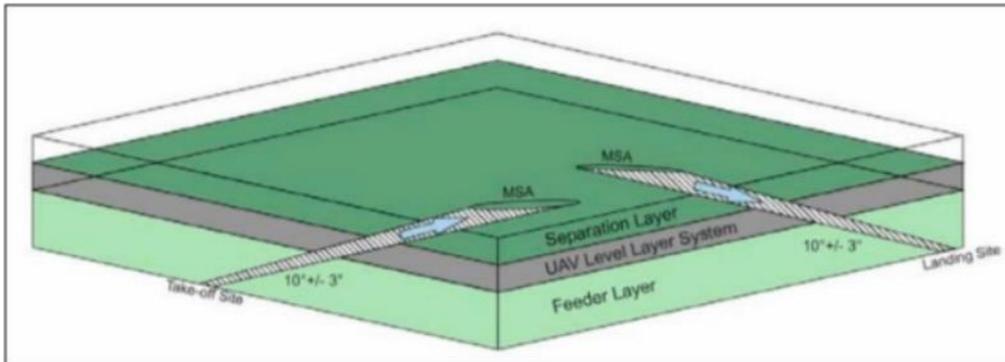


Ilustración 32.- Pendiente de ascenso en la zona III de los vertipuertos transcurrida entre los 150 y 180 metros, fuente [47]

Siguiendo estos pasos el radio resultante de la base superior sería de 170m de acuerdo con la inclinación nominal de  $10^\circ$ .

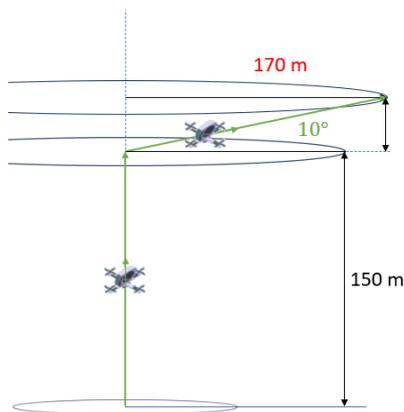


Ilustración 33.- Estudio del radio de la base superior con 10° de inclinación de ascenso y descenso, elaboración propia

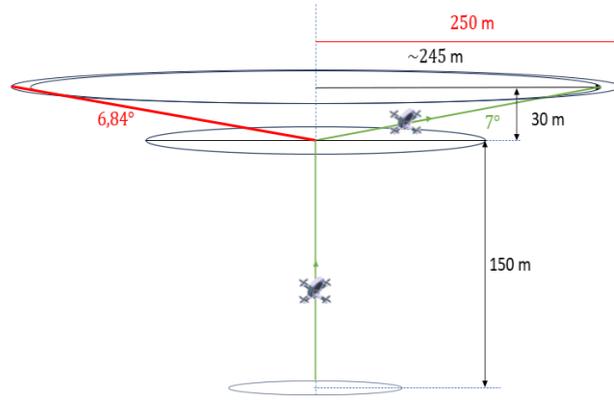


Ilustración 34.- Estudio del radio de la base superior con 7° de inclinación de ascenso y descenso, elaboración propia

Sin embargo, siguiendo el ángulo de ascenso más restrictivo, 7°, se tendría un radio final de base superior de 244,33 m, siendo esto aproximado a 250m, quedando finalmente una pendiente de ascenso del 12%.

$$R = \frac{30}{\text{tg}(7^\circ)} \rightarrow R = 244,33\text{m} \approx \mathbf{250\text{m}} \quad (4)$$

Además, se ha de tener en cuenta que este radio se dará en una altura de 180m aproximadamente ya que dan operabilidad a los tubos afluentes por donde circularán los PAVs. Se ha de recordar que la dimensión de la base inferior queda calculada en el apartado 7.5 ya que esta estructura de seguridad solo albergará la plataforma de operaciones, quedando exentas a esta el área ocupada por los edificios colindantes.

Siendo conocidas pues estas medidas se podrá calcular la incógnita  $\alpha$  mostrada en el apartado 7.5 aplicando cálculos trigonométricos.

$$\text{tga} = \frac{229,69}{180} \rightarrow \alpha = 51,92^\circ \approx \mathbf{52^\circ} \quad (5)$$

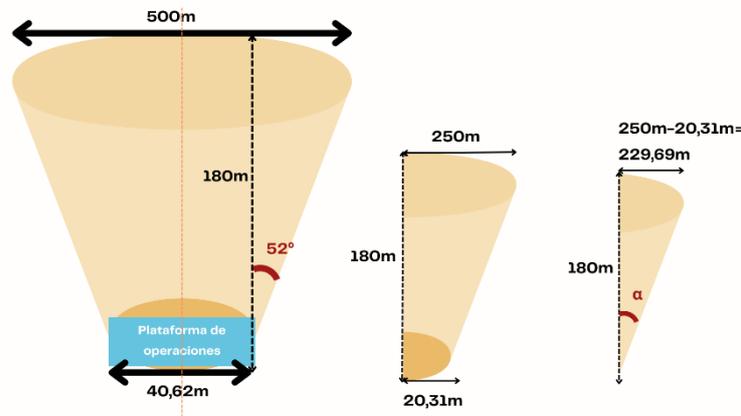


Ilustración 35.- Dimensionamiento de zona de seguridad troncocónica de los vertipuertos, elaboración propia

Quedando así la zona de seguridad de los vertipuertos totalmente definida. Sin embargo, para el cálculo del área del emplazamiento de los vertipuertos será necesario conocer el área aproximada de estos teniendo en cuenta los edificios adicionales a la plataforma de operaciones. Se le ha dado esta dimensión aproximada, ya que en un primer dimensionamiento de estas estructuras incluyendo todos los edificios colindantes a la plataforma de operaciones como son la terminal de pasajeros, hangar, etc. Se ha llegado a aproximar que serán necesarios unos 2160 m<sup>2</sup>. Pero de nuevo, todo esto quedará sujeto a modificaciones de acuerdo con la operativa final que tengan estas aeronaves no tripuladas en sus aterrizajes y despegues.

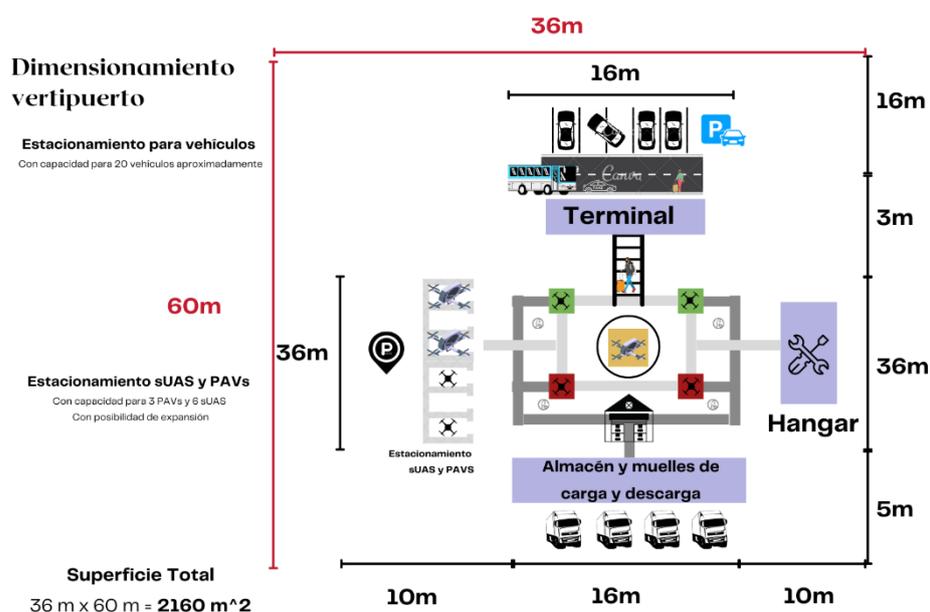


Ilustración 36.- Dimensionamiento vertipuerto, elaboración propia

A continuación, se tratará específicamente el emplazamiento de cada uno de ellos de acuerdo con las ubicaciones escogidas.

**Vertipuerto del Aeropuerto.** Con el fin de mitigar riesgos, se ha optado por situar el vertipuerto a una distancia de 1km de manera lateral con respecto a los ejes de pista, además de estar limitada la altura de vuelo a 150m para este tipo de aeronaves como se ha mencionado anteriormente.



Ilustración 37.- Localización lateral del vertipuerto con respecto a los ejes de pista, elaboración propia

Estudiando la ubicación de este vertipuerto se ha analizado la posibilidad de poder integrarlo en las instalaciones existentes del aeropuerto de Almería (entre la Terminal de carga y Aviación General), agilizando así el flujo de mercancías y pasajeros, siendo candidatas las dos ubicaciones a continuación presentadas.



Ilustración 38.- Dos posibles ubicaciones del vertipuerto 2 en las áreas circundantes del Aeropuerto de Almería, elaboración propia

Sin embargo, esto no ha sido así dado que estas áreas circundantes al aeropuerto de Almería podrán ser utilizadas para posibles desarrollos futuros del aeropuerto como la construcción de un edificio terminal de Aviación General (tabla 4.29 [48]) o para la instalación del sistema de luces de aproximación de precisión por la cabecera 07 [49].

Dada la ambigüedad en el asunto y con el fin de agilizar la tramitación de estas nuevas infraestructuras, se ha decidido no invadir las cercanías ni las instalaciones del aeropuerto existente y situarlo a un kilómetro del eje de pista.

Si finalmente se considerase cualquiera de estas ubicaciones se realizaría un estudio más pormenorizado y se establecerían carriles y aerovías específicas para poder dar servicio desde dichas ubicaciones.

**Vertipuerto del Polígono Industrial de San Rafael.** En este caso se ha decidido ubicarlo a la izquierda de todas las naves industriales por las que está conformado el polígono. Siendo este además un lugar idóneo ya que se trata de un terreno “virgen” donde no existe ningún tipo de infraestructura construida.



Ilustración 39.- Emplazamiento del vertipuerto sobre un terreno sin edificación previa, elaboración propia

**Vertipuerto del Puerto.** Para este caso en particular, se optará por la opción de un vertipuerto elevado.



Ilustración 40.- Ubicación del vertipuerto elevado sobre la superficie del puerto de Almería, elaboración propia

Esto es así, con el fin de poder compatibilizar las tareas relacionadas con la actividad marítima y aérea dentro de la propia estructura del puerto. Esta proximidad entre ambas infraestructuras podría agilizar el proceso de carga y descarga de mercancías entre los barcos y los almacenes del vertipuerto, optimizando así en cierta manera el sistema de transportes.

Siendo ya conocida la localización de los vertipuertos situados en la ciudad de Almería, se podría plantear el escenario de la implementación de un posible vertipad. Como se ha propuesto en el apartado 7.5.3, estos se situarán en las azoteas de los edificios y tendrá un carácter exprés para el depósito y recogida de mercancías.

Una ubicación candidata para albergar esta estructura podría ser la azotea del Hotel Vértice Indalo Almería, ya que recoge los requisitos necesarios tanto en dimensiones como en localización dentro de la ciudad.

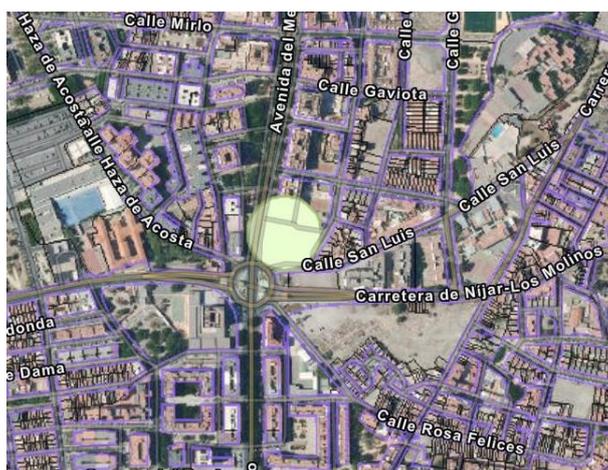


Ilustración 41.- Ubicación del posible vertipad de la ciudad de Almería sobre la azotea del Hotel Vértice Indalo Almería, elaboración propia

Pero la incorporación de esta estructura está aún en estudio, ya que dependerá del crecimiento y demanda que tenga esta movilidad aérea urbana en la ciudad.

### 8.3. Conectividad entre vertipuertos

En este apartado se propondrán varias trayectorias operables en la zona II, teniéndose que volar, por tanto, a través de la estructuración basada en capas y carriles.

Dado que este sistema de capas seguirá la misma geografía urbana que la ya existente, para poder esbozar estas trayectorias se ha usado como base las rutas que podría realizar un automóvil para moverse entre los vertipuertos mostrados, obteniendo como resultado lo expuesto en la siguiente ilustración.



Ilustración 42.- Trayectorias de conexión entre los vertipuertos y ampliación de un tramo aparentemente impreciso, elaboración propia

Tras analizar esta imagen, se considera que hay un tramo que puede llegar a confusión. Este constaría desde el punto donde parece que se unen dos rutas hasta la llegada al vertiporto del aeropuerto, por ello se hará zoom en esta zona con el fin clarificar qué situación sucede en esa parte de la ruta.

En esta ampliación situada en la parte superior derecha de la imagen, lo que se quiere mostrar es que hay dos capas individuales con sus propias intersecciones con el vertiporto, es decir no se une el tráfico en una sola capa como puede parecer en principio en la visión general.

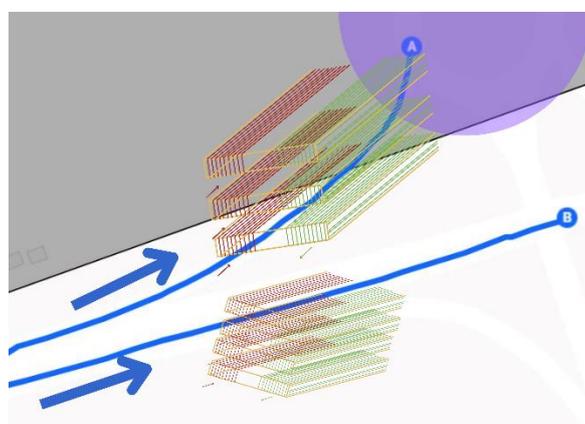
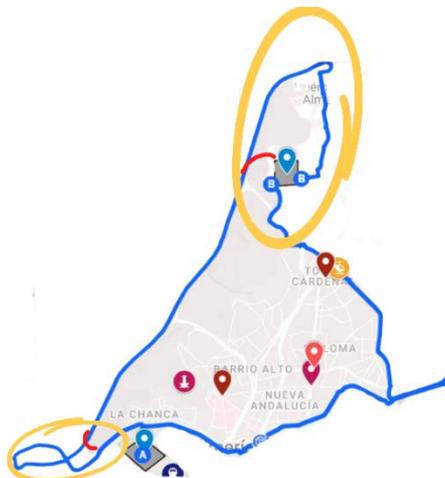


Ilustración 43.- Demostración de la estructuración de las trayectorias en capas superpuestas, elaboración propia

Además, como ya se explicó, aunque en la ampliación anterior parezca una sola capa, no hay que olvidar que en realidad son un conjunto de capas superpuestas unas encima de otras.

Una vez que ya se han planteado las trayectorias, tras examinarlas más en profundidad se puede llegar a la conclusión de que se podrían presentar un par de estudios de simplificación.



*Ilustración 44.- Señalización de los dos posibles estudios de simplificación de trayectorias, elaboración propia*

En estos estudios de simplificación se deberían de tener en cuenta varios factores como la orografía del terreno, edificaciones próximas, impacto de ruido en la zona, etc. Una vez que se verificase que se pudieran realizar y así optimizar las trayectorias, se mejoraría por tanto el rendimiento del sistema considerablemente.

Finalmente, cabe destacar que este estudio se ha enfocado en las rutas de unión entre los tres vertipuertos de la ciudad, pero por supuesto que esto es tan solo una pequeña parte de todas las trayectorias por desarrollar que ayudarán al crecimiento de la UAM en la ciudad de Almería, sin embargo, esta ampliación queda fuera del alcance de este proyecto.

#### **8.4. Comparativa de la disposición urbanística con la aérea**

Si se analiza la disposición urbanística de la ciudad, a la hora de crear nuevas trayectorias pueden surgir varios problemas, pero entre ellos hay uno que a nivel urbano está solucionado, pero a nivel aéreo quedaría por resolver. Se trataría de la situación de una intersección de calles, donde a nivel aéreo, por tanto, se cruzarían dos capas del mismo nivel de vuelo.

Una de las posibles soluciones sería optar por una solución similar a la existente a nivel terrestre, es decir la imposición de semáforos en estos puntos. Sin embargo, para este tipo de aeronaves no tripuladas este sistema no sería tan sencillo. Algunos de los problemas que podrían surgir son, el modo de captación por parte de las aeronaves de las señales mandadas por los semáforos o cómo serían estos colocados a tales alturas.

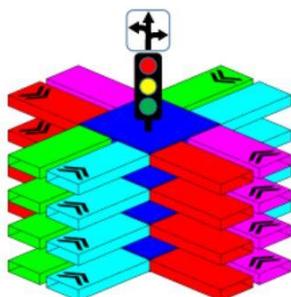


Ilustración 45.- Posible solución por semáforos ante la problemática de las intersecciones de capas, fuente [35]

Por ello, se ha optado por dar otra solución a la problemática, como dar una doble altura a una de las capas del mismo nivel de vuelo.

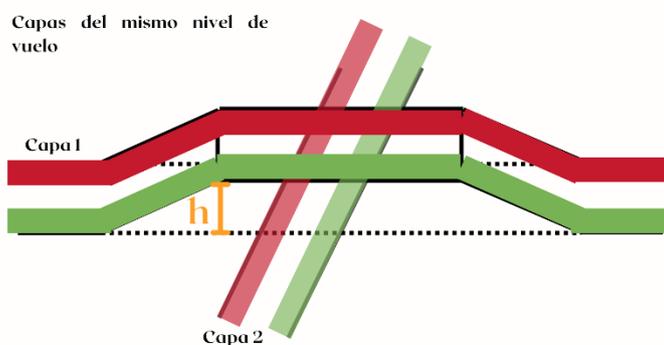


Ilustración 46.- Solución de las intersecciones de capas del mismo nivel a través de una doble altura, elaboración propia

Es decir, a una de las capas de la intersección se le daría una altura  $h$ , cuyo valor está aún por conocer. Sin embargo, en primer lugar, se deberá de calcular la distancia vertical,  $d_v$ , que hay entre capas y ver si sería posible introducir entre ellas esta altura  $h$  sin crear problemas de distancia entre capas. Si es cierto que esta doble altura acarrearía una serie de inconvenientes, debido a que, para poder introducir las, el número total de capas existentes en la zona II será menor, disminuyendo por tanto en gran medida la capacidad del sistema.

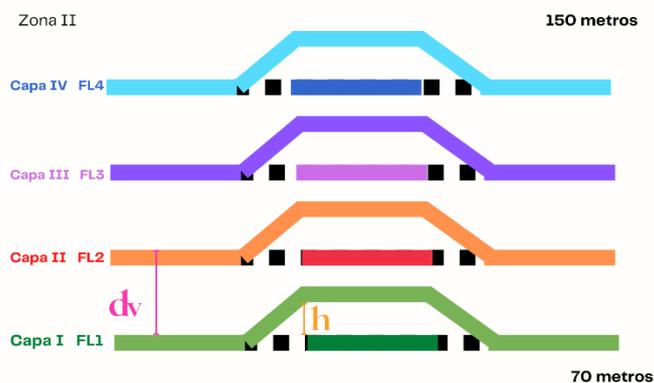


Ilustración 47.- Resultado final de la incorporación de dobles alturas en las capas con el fin de dar solución a la intersección entre ellas, elaboración propia

Pese a esta reducción de capacidad, la fluidez sí que se verá mejorada debido a que no habrá que parar el tráfico de aeronaves para decidir cuales tendrían prioridad de paso en una intersección. Además, esta solución genera una menor probabilidad de fallos que puedan acabar en colisiones o graves accidentes, suponiendo esto finalmente una mejora en la seguridad.

Una vez han sido evaluadas las distintas soluciones ante el problema de las intersecciones, se llega a una conclusión común, y es que es necesario un previo conocimiento de las dimensiones de las estructuras de capas y carriles para poder realizar una correcta elección en cuestiones como esta.

## Capítulo IX

# 9. DEFINICIÓN DE INCÓGNITAS DE DIMENSIONAMIENTO

Una vez se han definido las estructuras de las que se comprenderá el nuevo diseño de espacio aéreo, quedará como enigma el dimensionamiento de estas. Para ello, se definirán una serie de incógnitas que se corresponderán con las distintas distancias de estudio.

### 9.1. Definición de incógnitas del problema

En primer lugar, se tomará la estructura más simple del sistema, el carril. Aquí, se deberá de conocer la distancia de avance,  $d_{av}$ , que se exigirá entre dos UAS dentro de un mismo carril.



Ilustración 48.- Declaración de distancia de seguridad entre dos sUAS dentro de un mismo carril en la dirección de avance, elaboración propia

Estas dos aeronaves tendrán una misma dirección de avance, por lo que se tendrá que estudiar en profundidad como afecta el movimiento de un UAS sobre otro para poder dar un valor y un coeficiente de seguridad a esta distancia.

Una vez se analice la influencia que tendrán este tipo de aeronaves con el medio, se podrá estimar de igual manera el valor de la distancia lateral entre UAS. Pero sobre estas distancias laterales, se hará una distinción cuando se trate de carriles con el mismo sentido de circulación o de sentidos contrarios, por ello de aquí nacen dos nuevas incógnitas, por un lado, la distancia lateral entre carriles de un mismo sentido,  $d_{lms}$ , y por otro, la distancia lateral entre carriles de distinto sentido,  $d_{lds}$ .

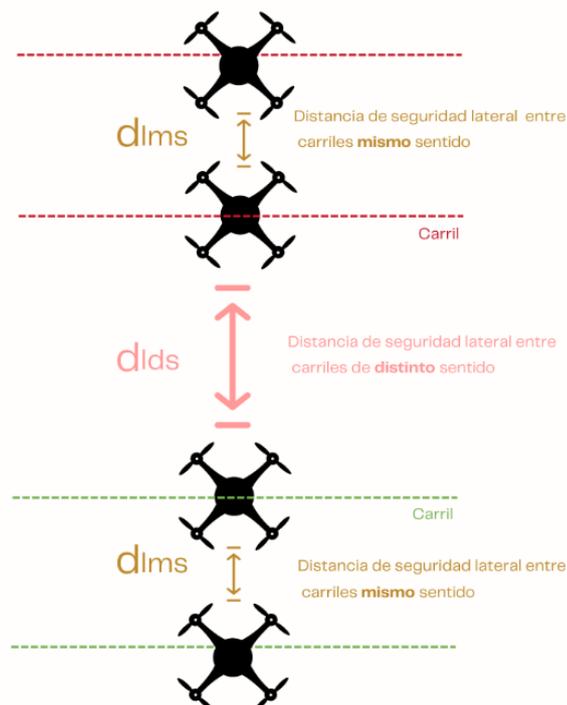


Ilustración 49.- Declaración de distancias laterales entre carriles de mismo y distinto sentido, elaboración propia

La sumatoria de estas distancias entre carriles conformarán lo conocido como  $A_c$  o ancho de capa siendo esta igual a la anchura de la calle en la que se quiera instaurar.

Además de la influencia que tendrá la aeronave en el plano horizontal, se deberá de considerar de igual manera como influye en el plano vertical.

Cuando se realice este estudio, se podrá conocer el valor de la altura de la estructura capa,  $h_c$ , así como la distancia vertical  $d_v$  que deberá de existir entre ellas. Retomando la Ilustración 47, se muestra que, siendo conocedores de la influencia vertical de una aeronave sobre otra, se podrá resolver también la incógnita  $h$  de la doble altura, así como el número de capas que podrán existir dentro una zona.

Por lo tanto, se muestra que para llevar a cabo el dimensionamiento de estas estructuras habrá que estudiar previamente la influencia que puede llegar a tener un UAS sobre otro.

## Capítulo X

# 10. ANÁLISIS DE FLUJO DE UN sUAS Y CÁLCULO DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD

Como se ha ido mencionando a lo largo de este informe, una de las grandes incógnitas por averiguar es la distancia que debe de existir entre UAVs para poder garantizar un vuelo seguro. Para ello será necesario comprender cómo se genera el flujo de aire desde un vehículo y en qué medida este flujo de aire podría afectar a otro, ya que se podrían generar problemas tales como pérdida de sustentación, reducción de control e incluso balanceo inducido.

El estudio de la turbulencia generada por la estela de grandes aviones de ala fija y helicópteros se ha investigado a fondo durante décadas, sin embargo, el estudio del flujo de los UAS más

pequeños, como cuadricópteros, se ha comenzado a estudiar en épocas recientes y aún no de forma amplia.

Actualmente, a pesar de que el número de estudios de flujo de este tipo de vehículos es bastante reducido, se ha optado por realizar un análisis de varios de ellos con el fin de poder llegar a unas conclusiones comunes y dar respuesta a la incógnita del problema presentado en este informe.

Entre estos estudios, se ha hallado una investigación del Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Iowa sobre la interacción existente entre los rotores de un sUAS [50]. Se demostró que los coeficientes de empuje de los rotores eran independientes de la distancia que existiera entre ellos, sin embargo, no sucedía lo mismo con las fluctuaciones de empuje. Estas aumentaban drásticamente cuando se disminuía la distancia entre rotores, observándose hasta una mejora del 250% aproximadamente. Aunque, esta reducción de distancia entre motores también acarrea consigo un aumento de ruido generado, siendo esto un factor problemático para la convivencia de estas aeronaves en zonas urbanas con población.

Con el fin de mitigar este problema con el ruido, se realizó un estudio experimental aplicando un dentado a las hélices de los rotores de los sUAS [51]. Se agregaron hasta tres tamaños distintos de dientes para determinar el potencial de atenuación de ruido que se conseguía.

Además, se midieron las fuerzas aerodinámicas, los niveles de presión sonora y los campos de flujo aguas abajo para comparar las características aerodinámicas y aeroacústicas entre la hélice de referencia (sin dentado) y las hélices de borde de fuga dentado (SSTE).

El flujo de este tipo de aeronaves también ha sido simulado por programas de CFD, con el fin de realizar una investigación exhaustiva de este. Entre ellos encontramos, un estudio donde se ha realizado un modelado explícito utilizando un enfoque LBM con refinamiento fijo y adaptativo [53] a través del paquete de herramientas de XFlow. Por último, dentro de esta área de estudio de programas CFD, se ha hallado una investigación sobre el vórtice de estela generado por las hélices de un cuadricóptero usando un mallado en ANSYS Fluent 19.2 [52].

### 10.1. Análisis de flujo

Teniendo en cuenta todos estos estudios científicos se realizará un análisis del flujo producido por los rotores de este tipo de aeronaves para distintos modos de vuelo. La mayoría de los estudios se centran en el caso de un cuadricóptero volando a punto fijo, teniendo en cuenta todos los empujes generados verticalmente por las hélices. Sin embargo, a continuación, se revisarán todos los resultados obtenidos tanto en vuelo estacionario como en vuelo en avance.

#### 10.1.1. Hélice de estudio y metodología

Para el estudio del flujo en el caso de vuelo en punto fijo, se tomarán como base principalmente en las fuentes [51] y [50], donde a través de medidas PIV se obtienen resultados del comportamiento flujo tras la hélice de un sUAS. Como se ha mencionado con anterioridad, estudio [51] se enfoca en el serrado de las hélices mientras que la investigación [50] se centra en la interacción entre los rotores de un mismo sUAS. En estos estudios expuestos por la Universidad de Iowa se han usado la misma hélice modelo, haciendo esto a los resultados equiparables y la geometría coincidente. El perfil aerodinámico escogido ha sido el E63 debido a su alta relación de sustentación a arrastre con un número de Reynolds bajo.

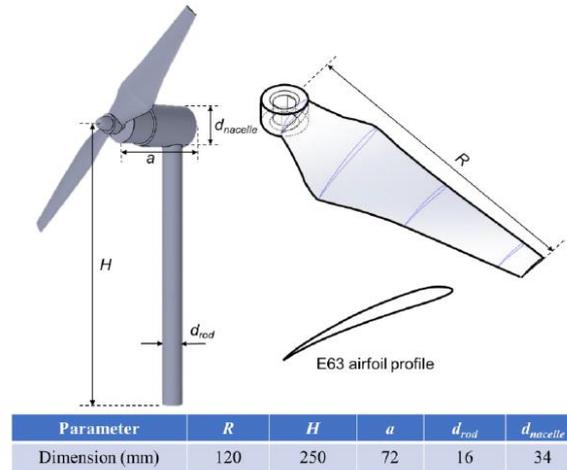
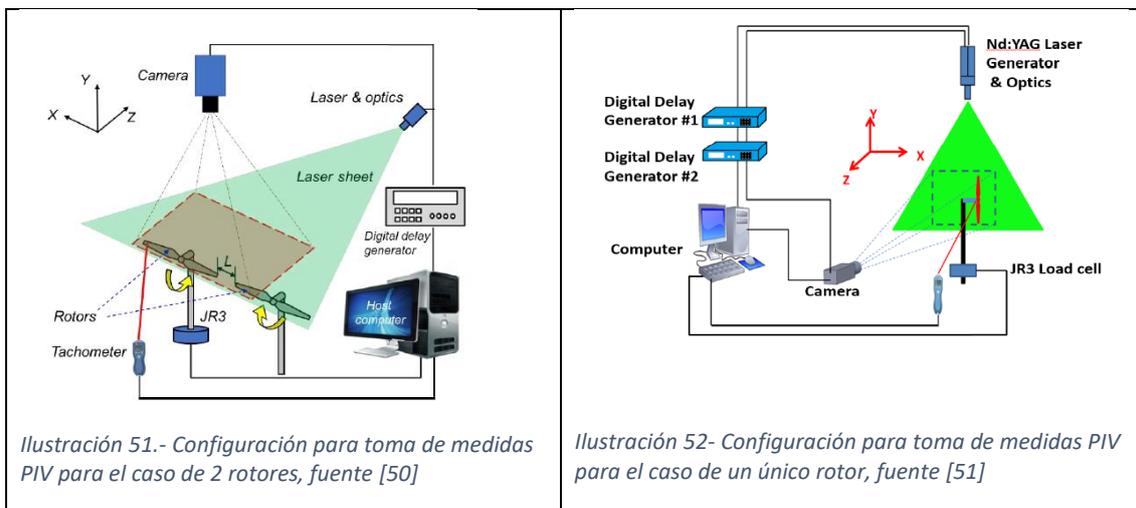


Ilustración 50.- Dimensiones del rotor de estudio (se ha tener en cuenta que en los estudios se ha considerado la estructura de soporte del rotor), fuente [50]

Los gráficos resultantes han sido obtenidos a través del método óptico de velocimetría de imagen de partículas (PIV)[51][50], el cuál suele ser usado recurrentemente en investigación y educación. Gracias a él se pueden obtener mediciones de velocidad instantánea y otras propiedades relacionadas en fluidos. La principal diferencia entre las mediciones PIV y el resto de las técnicas para medir flujos, es que las PIV produce campo vectoriales bidimensionales o incluso tridimensionales, mientras que las otras técnicas miden la velocidad en un punto.



Se exponen los de los dos casos, ya que, aunque el sistema de medición sea el mismo la disposición de los ejes varía.

Se estima que los resultados obtenidos por esta metodología alcanzan un nivel de incertidumbre del 3% para los vectores de velocidad instantánea y hasta un 10% para las mediciones de conjuntos de flujo, como ocurre con las distribuciones de vorticidad [50].

## 10.2. Resultados de mediciones y análisis de flujo en vuelo a punto fijo

Dado que se compararán continuamente los resultados obtenidos de los estudios [51] y [50], se ha de tener en cuenta que el estudio [50] expone continuamente el caso de un solo rotor y el de la interacción entre 2, lo cual resulta interesante, pero para poder dar una mayor fiabilidad a los resultados de dos rotores se debería de realizar algún estudio más sobre esta interacción.

A la hora de equiparar los resultados de los campos de velocidades entre ambos estudios, aparentemente parece que se usan diferentes órdenes de magnitud, pero esto no es realmente así.

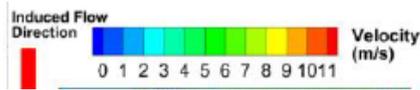


Ilustración 53.-Barra gráfica de valores de velocidad para el estudio [51]

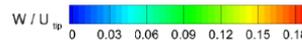


Ilustración 54.-Barra gráfica de valores de velocidad para el estudio [50]

Mientras que el estudio [51], presenta valores de 0-11 m/s, el estudio [50] muestra la siguiente formulación

$$\frac{W}{U_{tip}} \quad \text{donde} \quad U_{tip} = \omega D / 2 \quad (6)$$

Además, el estudio [50] puntualiza que el valor dado a  $U_{tip}$  será de 61 m/s, por lo que, si se escoge por ejemplo el valor máximo dado por la barra de la gráfica, tendremos que el valor de máximo de  $W$  será igual que el valor máximo dado por el estudio [51].

$$\frac{W}{U_{tip}} = 0,18 \quad \rightarrow \quad U_{tip} = 61 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad W = 0,18 \cdot 61 = 10,98 \approx 11 \text{ m/s} \quad (7)$$

Quedando así demostrado que en ambos estudios se usan los mismos órdenes de magnitud.

### 10.2.1. Resultados de mediciones PIV-Free Run

Con el fin de comprender el comportamiento del flujo, se comenzará por analizarlo con resultados de las mediciones PIV en modo Free Run. El término "Free Run" significa que la imagen tomada no es armónica con la rotación de la hélice. En el gráfico del estudio [51], los ejes X e Y se normalizaron en función del radio de la hélice (120 mm). Sin embargo, en el informe [50], los ejes de estudio serán los X y Z, aunque en ambos casos se estudia el flujo aguas abajo de la hélice.

Aunque en las imágenes sacadas de los estudios se muestre la variable D, en este informe el diámetro referente a las hélices será tratado como  $D_{hélice}$ .

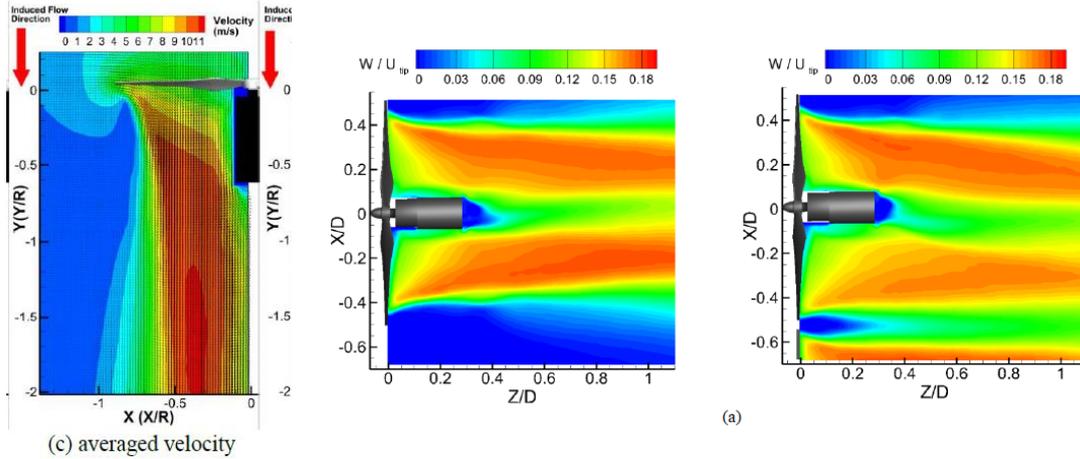


Ilustración 55.-Medidas PIV en Free Run del campo de velocidades, fuente [51]

Ilustración 56.- Medidas PIV en Free Run del campo de velocidades fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha)

Se puede apreciar que en ambos estudios se llegan a unos resultados muy similares, diferenciando principalmente dos regiones. El flujo inactivo el cual tiene una velocidad muy baja representado de color azul y la región colorida situada debajo de la hélice donde se desarrolla el flujo inducido. En esta última región las velocidades son bastante más elevadas, produciéndose por tanto una disminución de la presión y una contracción del flujo, de acuerdo con el teorema de Bernoulli.

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2 \quad (8)$$

Tomando la Ilustración 56 como referencia, esta contracción radial es más notoria desde la punta de pala ( $0,4D_{hélice}$ ) hasta cerca de la posición de la raíz ( $0,3D_{hélice}$ ) a medida que se desarrolla el flujo aguas abajo.

A pesar de todas estas similitudes, también se encuentra una diferencia entre los casos expuestos en la Ilustración 56. Comparando con el caso de un solo rotor, se encontró que el campo de velocidad medido en el caso de dos rotores estaba ligeramente desviado hacia abajo en la región de la parte inferior ( $-0,5 < X/D_{hélice} < -0,2$ ), es decir, en dirección hacia el rotor adyacente. Se cree que este efecto es causado por el efecto Coanda (un fenómeno en el que un flujo tiende a atraer a un objeto cercano).

### 10.2.2. Resultados de mediciones PIV-Phase Locked

En estos estudios también se tomaron medidas PIV en modo “Phase Locked”, con el fin de obtener imágenes “congeladas” de las estructuras de vórtice inestables en la estela del rotor en diferentes ángulos de fase.

El ángulo de fase se definirá para el estudio [50] como el ángulo entre el plano vertical Y-Z y la posición de una pala del rotor marcada. Esta pala marcada estará posicionada de manera coincidente con el plano Y-Z para el ángulo de fase  $\theta = 0^\circ$ . Para el caso del estudio [51], se tomará la misma referencia con la diferencia de que debido a la posición de los ejes en este caso, en lugar del plano vertical Y-Z se tratará del plano vertical X-Z.

**10.2.2.1. Campos de velocidades**

A continuación, se mostrarán las distribuciones de velocidad promedio de fase obtenidas en los distintos estudios.

• **Phase Locked  $\theta=0^\circ$**

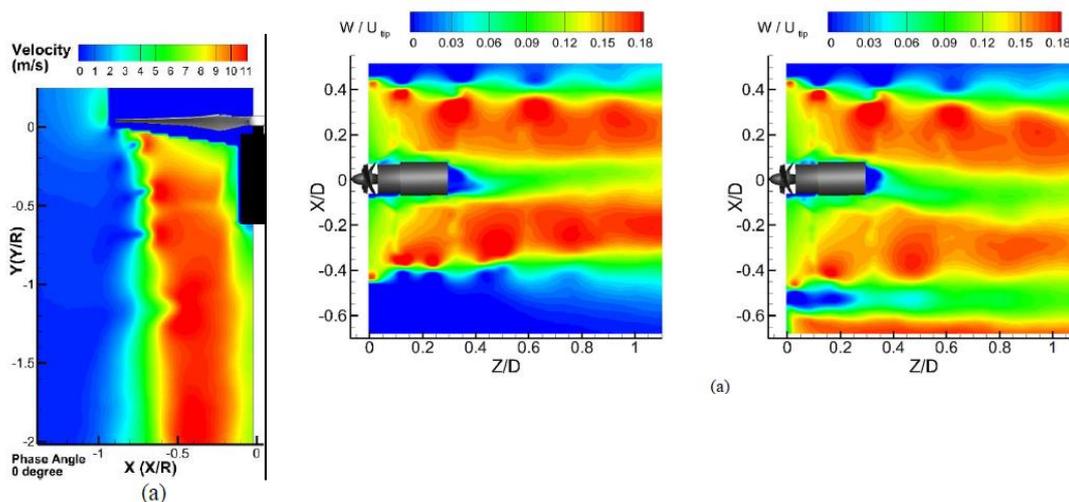


Ilustración 57.- Campo de velocidades promedio para  $\theta=0^\circ$ , fuente [51]

Ilustración 58.- Campo de velocidades promedio para  $\theta=0^\circ$ , fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha)

En este caso con un ángulo de fase igual a  $0^\circ$ , en ambos estudios se pueden observar cómo aparecen estructuras en el flujo en forma de onda en la zona de punta de pala. Todos coinciden en que el flujo más cercano a la hélice tiene una ondulación más pronunciada, sin embargo, esto se irá disipando aguas abajo.

Cabe destacar que en el caso de 2 rotores estas estructuras onduladas se disipan mucho más rápido y son menos pronunciadas que en los casos de un solo rotor.

• **Phase Locked  $\theta = 120^\circ$**

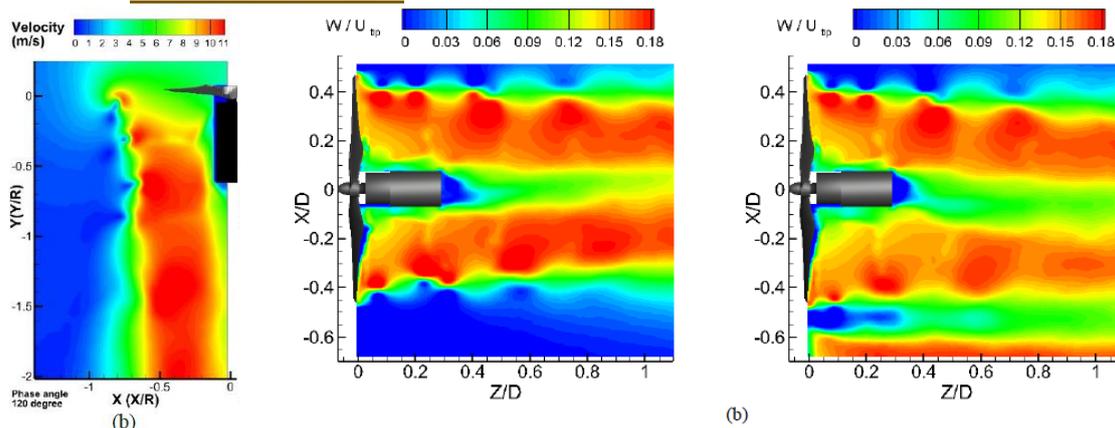


Ilustración 59.- Campo de velocidades promedio para  $\theta=120^\circ$ , fuente [51]

Ilustración 60.- Campo de velocidades promedio para  $\theta=120^\circ$ , fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha)

Comparando los resultados para  $\theta = 120^\circ$  en ambos se puede ver cómo el flujo tiene un comportamiento de nuevo muy similar. Por ejemplo, vuelven a aparecer estas ondulaciones debido al desprendimiento periódico de vórtices de punta detrás del rotor, quedando estas casi totalmente disipadas a una distancia de  $1,0D_{hélice}$ .

Donde sí que se pueden observar diferencias entre estudios es en la zona colindante a la hélice. El estudio [51] muestra esta zona con una velocidad de magnitud media representada en color verde, mientras que para el caso del estudio [50], lo representa como una zona de alta velocidad marcada en naranja y rojo.

- ***Evolución del campo de velocidades por el cambio de ángulo de fase***

Ya una vez analizados los estudios de los campos de velocidades para distintos ángulos de fase, se ha llegado a una serie de conclusiones.

Una de las principales diferencias que se ha observado está relacionada con la contracción del flujo en la zona cercana a la hélice. El caso de  $\theta = 0^\circ$  podría llegar a ser comparable con el caso visto anteriormente en "Free Run", donde como ya se comentó, el flujo se va contrayendo progresivamente desde la punta de la hélice hasta su raíz aproximadamente. Sin embargo, esto para nada es así en el caso de  $\theta = 120^\circ$ , aquí la velocidad del flujo se mantiene constante desde la punta hasta la raíz de dicha hélice.

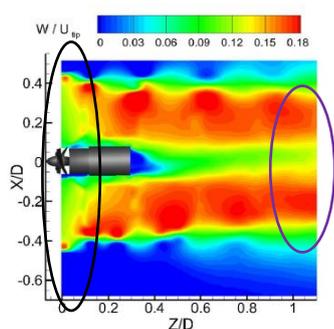


Ilustración 61.- Campo de velocidades promedio para  $\theta=0^\circ$ , fuente [50]

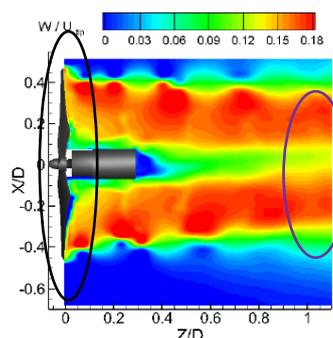


Ilustración 62.- Campo de velocidades promedio para  $\theta=120^\circ$ , fuente [50]

Otra diferencia entre los distintos ángulos de fase es su mezclado en la zona próxima  $1,0D_{hélice}$ , señalado en las imágenes anteriores. En el caso de  $\theta = 120^\circ$  este mezclado se produce un poco antes, además sus estructuras onduladas son más acentuadas y con una disipación más tardía que para el caso de  $\theta = 0^\circ$ .

En el caso de 2 rotores independientemente del ángulo de fase en el que se encuentre la hélice, las estructuras de flujo detrás del rotor se desplazaron radialmente hacia abajo hacia el rotor adyacente lo que concuerda con los resultados medidos en el caso de "Free Run".

#### 10.2.2.2. ***Distribución de vorticidad***

Para poder ver de una manera más clara el efecto de las interacciones del rotor con estas estructuras onduladas se estudiarán las distribuciones de vorticidad de los ejemplos anteriores, entendiendo por vorticidad como la magnitud física empleada para cuantificar la rotación de un fluido.

Estas estructuras onduladas vistas en los apartados anteriores se traducirán como vórtices y capas en los gráficos siguientes. Estos vórtices se formarán tras la punta de pala debido a la diferencia de presión dentro del álabe, mientras que las capas de corte serán resultado de la fusión de las capas límite de las superficies superior e inferior del álabe.

• *Phase Locked  $\Theta=0^\circ$*

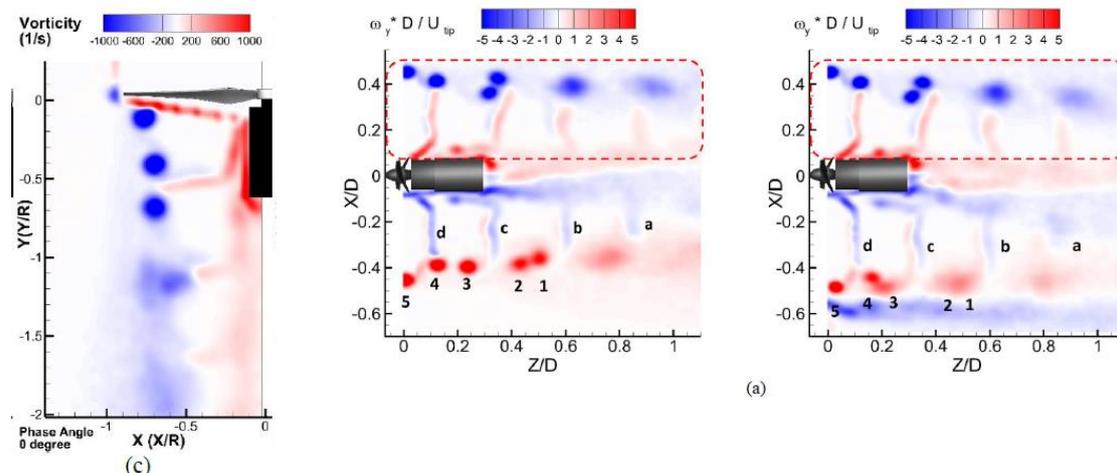


Ilustración 63.- Distribución de vorticidad para  $\Theta=0^\circ$ , fuente [51]

Ilustración 64.- Distribución de vorticidad para  $\Theta=0^\circ$ , fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha)

En estos casos, los resultados obtenidos del estudio [51] solo son comparables con los obtenidos en la parte superior del estudio [50] (zonas punteadas).

A simple vista, la principal diferencia que se observa entre los resultados de los dos estudios es que en caso del estudio [51], hay hasta tres estructuras de vórtice de una intensidad considerable mientras que en estudio [50] se cuentan hasta 4. Sin embargo, para ambas investigaciones las capas con una mayor intensidad de vorticidad se encuentran junto a la hélice y al cuerpo del rotor.

En las partes inferiores del estudio [50] se han enumerado los vórtices (1-5) y las capas (a-d). Esto es así, para comentar de manera más sencilla la diferencia en la vorticidad del flujo con la aparición de un segundo rotor (en este caso la distancia entre rotores es de  $L = 0,05D_{hélice}$ ). Se aprecia como para el caso de un solo rotor (gráfico de la izquierda) un vórtice en la punta se desprendía de esta y luego se propagaba axialmente aguas abajo. Durante este proceso, las parejas de estructuras de vórtice (es decir, como el vórtice 4 con el vórtice 3, el vórtice 2 con el vórtice 1) se fusionarían lentamente en formar tan solo uno aproximadamente a una distancia de  $0,7D_{hélice}$ . Finalmente, este se acaba desvaneciendo por completo más allá de  $1,0D_{hélice}$  debido a la turbulencia de la estela aguas abajo.

En el caso de los dos rotores, la distribución de capas es muy similar a la de un solo rotor, pero las estructuras de vórtice sin embargo aquí se disipan bastante más rápido debido a la interferencia entre los vórtices generados por cada hélice.

• Phase Locked  $\theta=120^\circ$

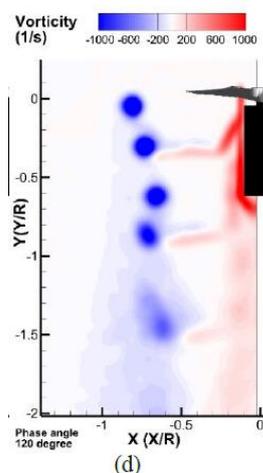


Ilustración 65.- Distribución de vorticidad para  $\theta=120^\circ$ , fuente [51]

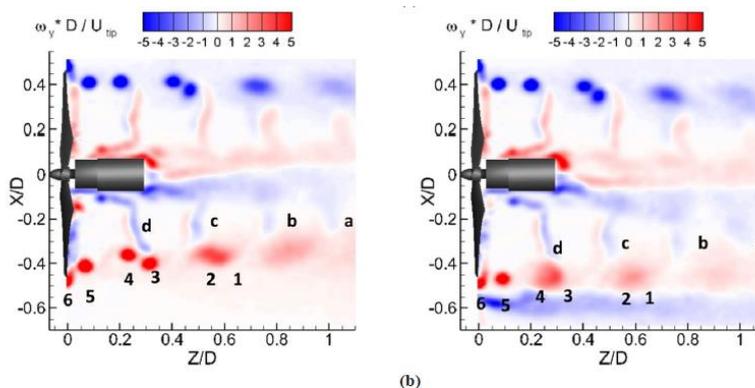


Ilustración 66.- Distribución de vorticidad para  $\theta=120^\circ$ , fuente [50]. Caso de un rotor (izquierda), caso de dos rotores (derecha)

Para el caso de  $\theta = 120^\circ$ , en la comparativa entre estudios es bastante más similar. En este caso coinciden el número de vórtices pronunciados, aunque de manera visual las capas junto a la estructura del rotor parecen más intensas para el caso del estudio [51].

Para la equiparación entre el caso de uno y dos rotores, de nuevo, se enfocarán en las partes inferiores de las gráficas de la derecha. El cambio más significativo se encuentra en los vórtices 3 y 4, donde para el caso de un rotor único son dos estructuras diferenciadas mientras que para el otro gráfico estas dos estructuras se han fusionado bastante siendo aparentemente un solo vórtice. Como ha ocurrido en el caso anterior, con la presencia de un segundo rotor la disipación del flujo se produce de una manera más temprana.

• Evolución de la vorticidad para distintos ángulos de fase

Realizando una contrastación de la distribución de vórtices entre los distintos ángulos de fase, se puede apreciar como para el caso de  $\theta = 120^\circ$  las estructuras de vórtices se disipan más aguas abajo, es decir, necesitan una mayor distancia para lograr su disipación. Un ejemplo claro de esto es el caso del vórtice "a", viendo como para  $\theta = 120^\circ$  ha superado la distancia de  $1,0D_{hélice}$ .

Otras de las diferencias producidas por los distintos ángulos de fase será la evolución de la capa "d". En  $\theta = 0^\circ$  esta capa es adyacente al vórtice 4, sin embargo, para  $\theta = 120^\circ$  la capa "d" interactúa más con el vórtice 3 que con el 4. Esto es debido a que la velocidad de convección de la capa fue mayor que la del vórtice de punta, por lo tanto, el borde exterior de la capa de corte supera al vórtice correspondiente lo que lleva a una interacción compleja entre las estructuras de vórtice.

10.3. Resultados de mediciones y análisis de flujo en vuelo en avance

La mayoría de las investigaciones científicas han estudiado el flujo de las hélices de un sUAS en vuelo a punto fijo, sin embargo, son muy pocas las que se han dedicado a analizar este flujo en vuelo en avance. Esto hace que la siguiente información carezca de contrastación por falta de estudios con los que comparar resultados y deja pendiente como trabajos futuros el estudio del flujo de sUAS para este tipo de vuelo.

El estudio [51] será la principal fuente de información para este apartado, por lo tanto, la nave de estudio, así como su hélice y rotores serán los mismos que los vistos en el apartado de resultados de vuelo en punto fijo.

### 10.3.1. Medidas de fuerzas aerodinámicas

Con el fin de realizar un análisis de las fuerzas aerodinámicas soportadas por este tipo de aeronaves, se ha examinado una serie de gráficas donde se enfrentará la fuerza de sustentación con otros parámetros competentes de la aeronave como la potencia o la velocidad angular. Estos resultados serán medidos para diferentes ángulos de inclinación (3, 5, 10 y 15°).

En primer lugar, se mostrarán los gráficos donde se enfrenta la sustentación frente a la potencia. Se ha de tener en consideración que la sustentación de diseño para la aeronave de este estudio tiene un valor de 3 Newtons, además de que la función de interés será la asociada a la hélice de referencia, es decir, sin ningún tipo de serrado (representada en color rojo).

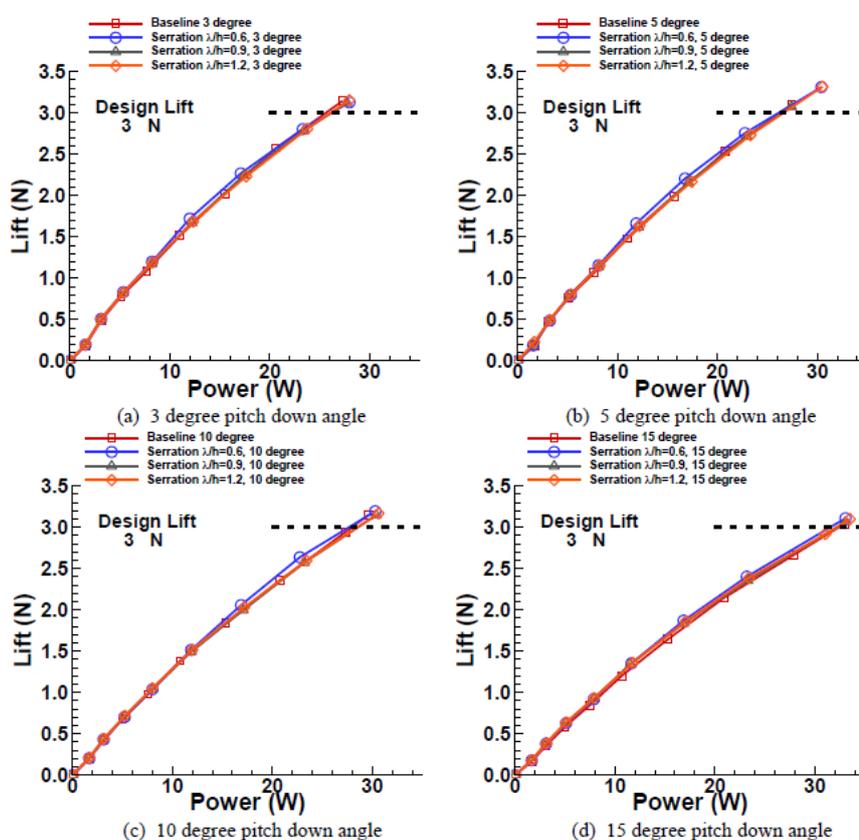


Ilustración 67.- Representaciones gráficas de la sustentación frente a la potencia en diferentes ángulos de inclinación, fuente [51]

Tras analizar los resultados, se puede apreciar como el incremento del ángulo de inclinación implica un aumento de potencia para poder crear la misma sustentación.

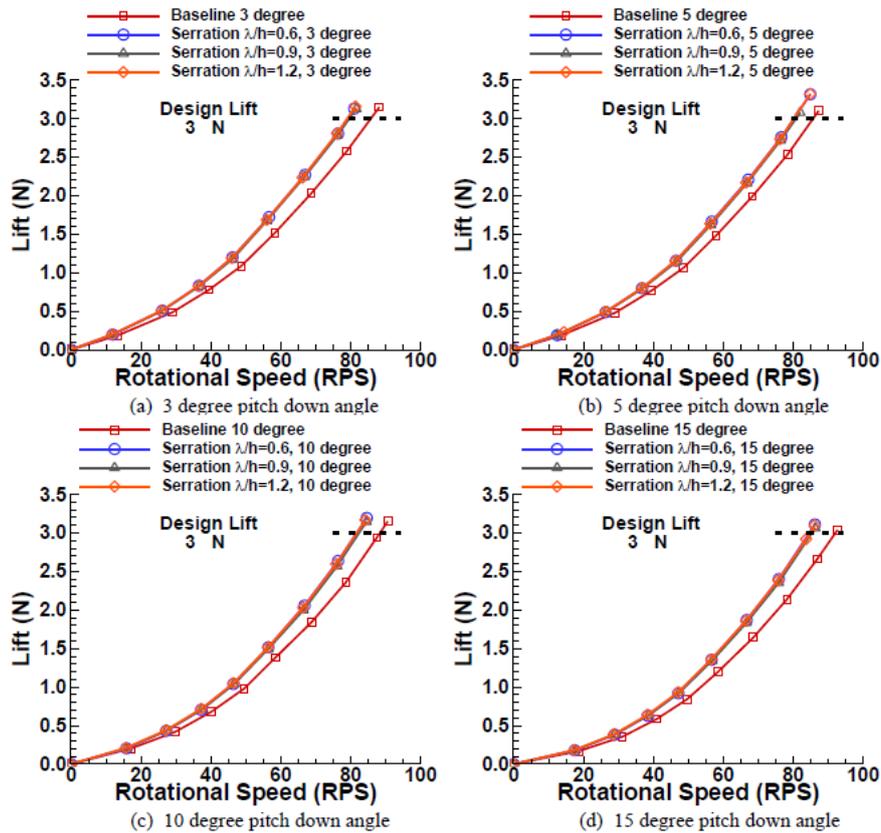


Ilustración 68.-Representaciones gráficas de la sustentación frente a la velocidad angular (RPS) para diferentes ángulos de inclinación, fuente [51]

En este caso para la velocidad rotacional frente a la sustentación, se ha de tener en cuenta de nuevo que la función deseada es la correspondiente con la hélice de referencia (representada de rojo y cuadrados). En estas gráficas vuelve a ocurrir un fenómeno muy similar al sucedido con la potencia, con el aumento del ángulo de inclinación la velocidad de rotación ha tenido que aumentar con el fin de seguir manteniendo el mismo valor de fuerza de sustentación.

### 10.3.2. Mediciones de campo de flujo

Para este modo de vuelo se han realizado unos análisis del comportamiento del flujo donde se verán representados tanto como el campo de velocidades, así como la distribución de la vorticidad.

#### 10.3.2.1. Hélice no perpendicular al flujo

A diferencia de un vuelo en punto fijo, en este caso la hélice no se encuentra en una posición perpendicular con respecto al flujo de entrada por lo que la velocidad relativa de las 2 palas laterales serán diferentes.

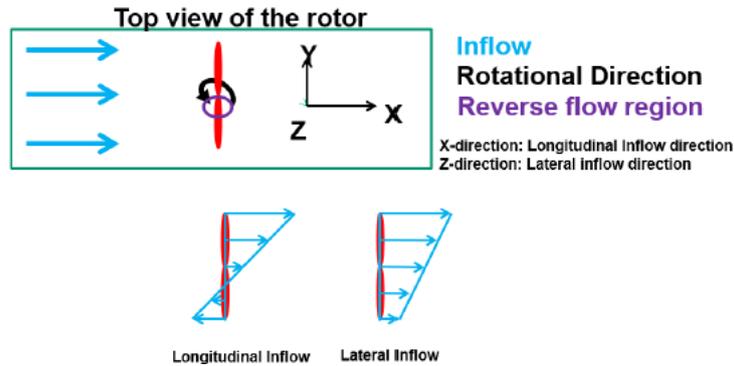
Por un lado, estará la pala de avance la cual rota hacia el flujo de entrada y cuya velocidad relativa quedaría definida como

$$V_{relativa} = V_{rotacional} + V_{flujo\ entrada} \quad (9)$$

Mientras que, por otro, se encontrará la pala en retirada la cual rota con el flujo de entrada y cuya velocidad relativa sería

$$V_{relativa} = V_{rotacional} - V_{flujo\ entrada} \quad (10)$$

Además, hay una cierta región cerca del centro donde la velocidad del flujo de entrada es mayor que la velocidad rotacional causando que el aire fluya desde el borde de salida hasta el borde de ataque, siendo esto conocido como región de flujo inverso.



**10.3.2.2. *Campo de velocidades con mediciones PIV en "Free Run"***

Para las mediciones de campo de velocidades en vuelo en avance se ha utilizado la misma metodología que para el vuelo estático, es decir, las mediciones PIV, en este caso en "Free Run". Además, se ha de considerar que el ángulo de inclinación del rotor de estudio en este caso es de 10°.

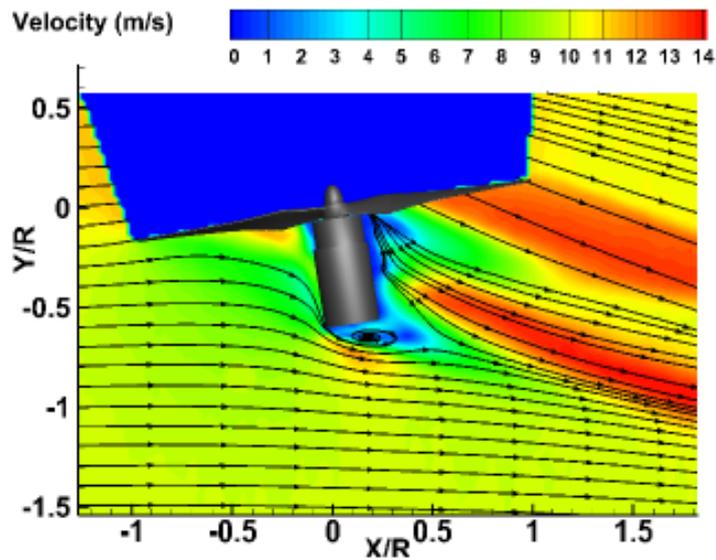


Ilustración 69.- Resultados PIV en "Free Run" para vuelo en avance con velocidad inicial de 10 m/s, fuente [51]

Como se aprecia en la imagen anterior hay claramente definidas dos regiones de alta velocidad aguas abajo del rotor las cuales son inducidas por la propia rotación de la hélice.

Otro fenómeno interesante es como se puede apreciar la vorticidad producida por el flujo que pasa a través del rotor (representado en azul en las zonas debajo de la hélice) alcanzando hasta la zona inferior de este donde además se puede observar la aparición de flujo reverso.

Partiendo de la ilustración anterior, se han obtenido las siguientes gráficas donde se muestra la evolución de los valores de velocidad del flujo en las distancias de  $1R_{hélice}$  y  $1,5R_{hélice}$  respecto de la hélice.

De nuevo, se recuerda que para este informe el radio desde la hélice que aparece en las imágenes como  $R$  será nombrado como  $R_{hélice}$ .

En ambos casos se parte del valor de 10 m/s ya que es el valor que tiene definido la velocidad inicial.

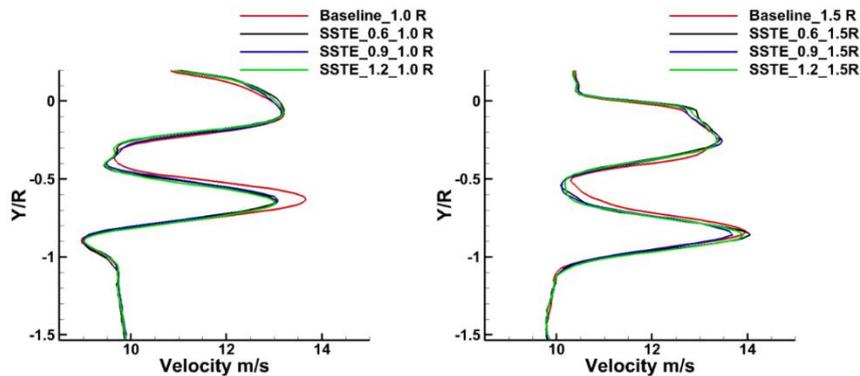


Ilustración 70.- Comparación de velocidad en diferentes ubicaciones ( $1R_{hélice}$ ,  $1.5R_{hélice}$ ) aguas abajo en vuelo en avance, fuente [51]

Para este estudio la función de interés será la representada en rojo, donde para el caso de  $1R_{hélice}$  se alcanza un valor máximo de velocidad de 13,5 m/s aproximadamente mientras que, para el caso de  $1,5R_{hélice}$  el valor máximo alcanzado será muy próximo a 14 m/s.

La diferencia entre estas gráficas se encuentra a una altura de  $Y/R_{hélice} = -0,8$ , donde el gráfico de velocidades de  $1R_{hélice}$  alcanza velocidades inferiores a la inicial, siendo esto debido por la vorticidad generada debajo del rotor y el efecto del flujo reverso. En cambio, esta vorticidad no llega a influenciar a una distancia de  $1,5R_{hélice}$ , es más sucede todo lo contrario, es en esta altura de  $Y/R_{hélice} = -0,8$  donde se alcanza los mayores valores de velocidad.

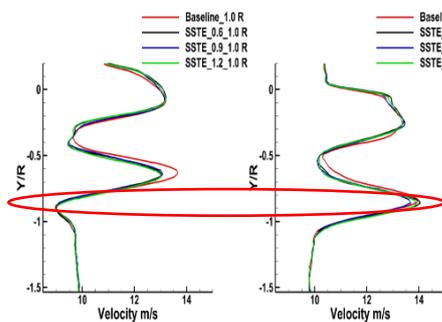


Ilustración 71.- Diferencia de tendencias en  $Y/R_{hélice}=-0,8$  en las gráficas de velocidad entre las distancias de  $1R_{hélice}$  y  $1,5R_{hélice}$ , fuente [51]

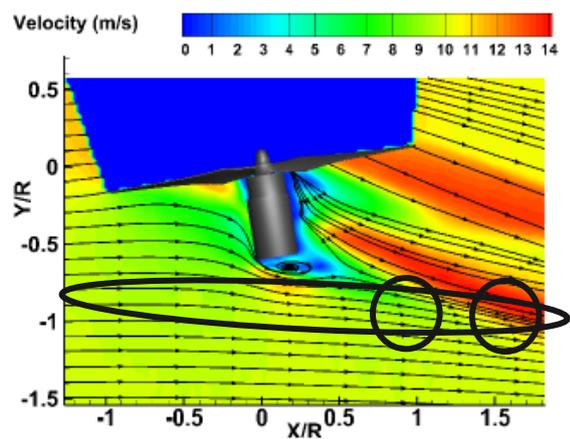


Ilustración 72.- Extrapolación de la diferencia de tendencias en las velocidades en el gráfico de medidas PIV, fuente [51]. Se ha señalado la zona próxima a  $Y/R_{hélice}=-0,8$ .

### 10.3.2.3. Vorticidad con mediciones PIV en "Phase Locked"

En cuanto al análisis de la distribución de vorticidad se ha empleado de nuevo las mediciones PIV pero en este caso en "Phase Locked" con un ángulo de acimut de 270° y en un radio del 90% desde el centro de la rotación.

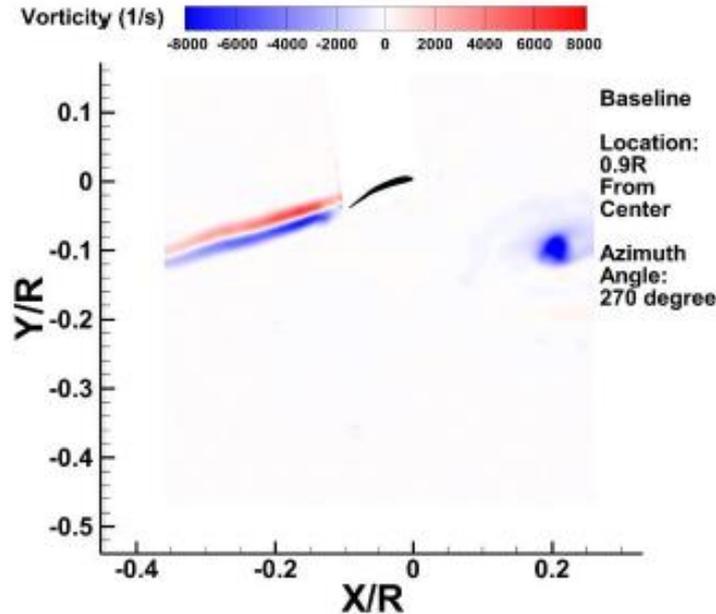


Ilustración 73.-Resultados de medición de PIV con "Phase Locked" en  $\psi=270^\circ$  con un radio del 90 %

La región azul a  $0,2R_{hélice}$  en la parte delantera de la superficie aerodinámica es el vórtice de punta generado por otra pala.

En este caso se puede observar el desprendimiento de la capa límite y el tamaño de estela generado por este perfil aerodinámico E63. Además, se puede apreciar como la vorticidad proveniente de extradós alcanza valores positivos mientras que para el caso de intradós por el contrario se alcanzan valores negativos.

El gráfico muestra el alcance de la estela hasta una distancia de  $0,4R_{hélice}$  aproximadamente, donde se puede ver que ésta pierde levemente intensidad, pero sin llegar al mezclado de flujo. Probablemente en una distancia mayor este suceso se produzca y se continúe perdiendo dicha intensidad de vorticidad provocada por la pérdida de velocidad del flujo haciendo que el tamaño de la estela disminuya.

A raíz del gráfico anterior, se han extraído las siguientes funciones representando la evolución de la velocidad en distintas distancias aguas abajo de la hélice, donde de nuevo la función de interés sigue siendo la representada en rojo.

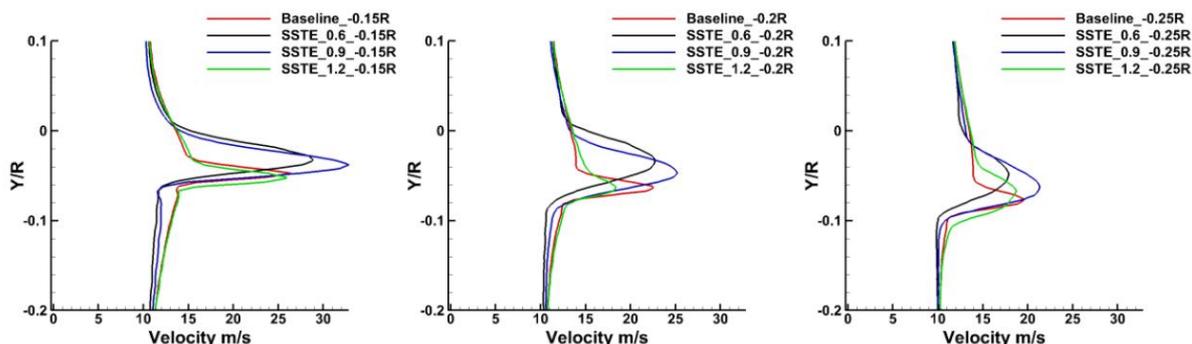


Ilustración 74.- Comparación de velocidad en diferentes ubicaciones aguas abajo ( $-0.15R_{hélice}$ ,  $-0.2R_{hélice}$ ,  $-0.25R_{hélice}$ ) en vuelo en avance, fuente [51]

En este caso, a diferencia de Ilustración 70, todas siguen una misma tendencia. De esta manera se puede ver más claramente la disminución de la velocidad de flujo con el avance de este. Cogiendo valores aproximados de las funciones, la velocidad variaría de  $26 \text{ m/s}$  en una distancia de  $-0.15R_{hélice}$  hasta un valor de  $20 \text{ m/s}$  para  $-0.25R_{hélice}$ , disminuyendo así unos  $6 \text{ m/s}$  en una distancia de  $0.1R_{hélice}$ .

Haciendo balance entre la Ilustración 70 e Ilustración 74 se puede ver como en un vuelo en avance a una distancia cercana a la hélice de rotación ( $0.15R_{hélice}$ ) el flujo alcanza muy altas velocidades mientras que a una distancia cercana al valor del diámetro de dicha hélice ( $1.7R_{hélice}$ ) esta velocidad ha decrecido hasta en un  $46,15\%$ .

Teniendo en cuenta estas conclusiones, una primera aproximación para deducir una distancia de seguridad en la que el flujo de salida no supone una perturbación para otra aeronave podría ser  $2R_{hélice}$  (más exactamente sería  $2,06R_{hélice}$ ) desde la hélice, ya que en una distancia así, la velocidad debería haber disminuido en torno a un  $61,5\%$  acabando en valores de la magnitud de  $10 \text{ m/s}$ , es decir, en un valor casi igual al de la velocidad de vuelo.

Tras haber expuesto el estudio realizado por Zhe Ning [51] no se ha encontrado otra fuente de información del flujo en sUAS en vuelo en avance además de la documentación aportada por un estudio de la Universidad Tecnológica de Nanyang [52]. Pero este último documento simplemente confirma que el estudio de esta materia puede ser realizado fiablemente a través de la herramienta de ANSYS Fluent 19.2, dado que los resultados obtenidos a través de esta resultan ser muy similares a los recogidos en el estudio experimental [50].

#### 10.4. Alcance del flujo

Una vez analizados los resultados obtenidos en distintos estudios sobre el flujo alrededor de una hélice de un sUAS en distintos modos de vuelo, se podría decir que aún no se ha realizado el estudio de la estela de un cuadricóptero por completo teniendo en cuenta la interacción de los cuatro rotores a la vez. Además, como se puntualiza en el estudio [52], todos los estudios se centran en el flujo de aire alrededor del cuadricóptero, pero aún no ha habido ninguno que investigue qué sucede con este flujo de aire mucho después de que haya circulado el dron y cómo evoluciona con el tiempo.

En parte, debido a esta falta de datos, las conclusiones aportadas a continuación tendrán un carácter más orientativo que un valor riguroso. Asimismo, se debe de tener en cuenta que el valor aportado será adimensional, por lo que podrá ser aplicado a todos los sUAS que vuelen sin importar la capa a la que pertenezcan.

Para explorar más a fondo la física producida por las interacciones rotor-rotor de pequeños UAV en vuelo estacionario, se han realizado estudios estereoscópicos utilizando el sistema de medida PIV visto anteriormente [50]. Estas medidas SPIV cuantificarán el campo de flujo complejo detrás de los rotores en múltiples ubicaciones a lo largo del flujo inducido.

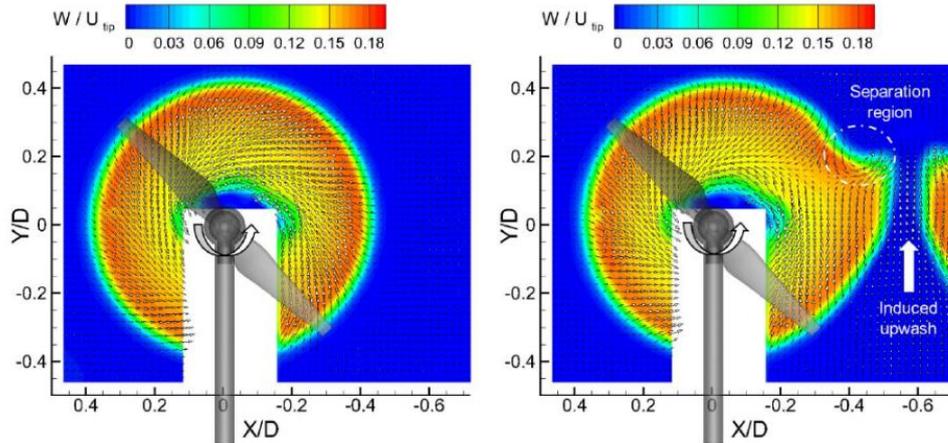


Ilustración 75.- Resultados SPIV del campo de velocidad medio para las configuraciones de rotor único (izquierda) y rotor doble (derecha,  $L = 0,05D_{hélice}$ ) en el plano transversal  $Z/D_{hélice} = 0,1$ , fuente [50]

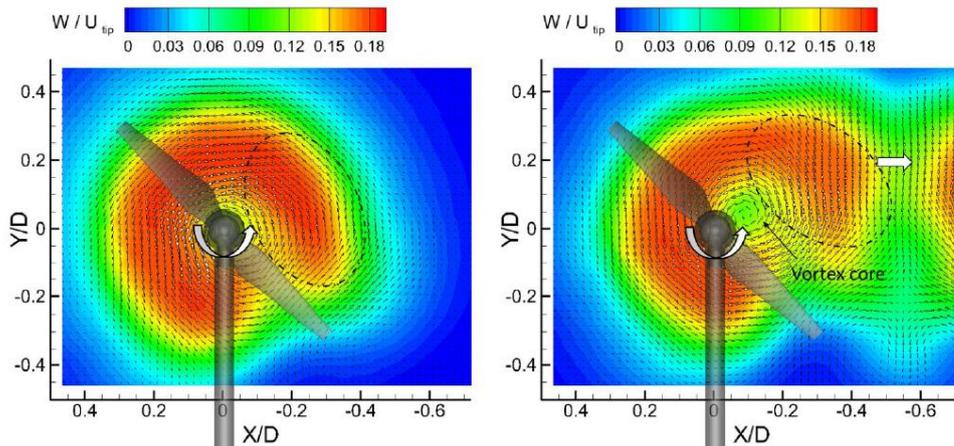


Ilustración 76.- Resultados SPIV del campo de velocidad medio para las configuraciones de rotor único (izquierda) y rotor doble (derecha,  $L = 0,05D_{hélice}$ ) en el plano transversal  $Z/D_{hélice} = 1,0$ , fuente [50]

En la Ilustración 75 donde se muestra el contorno de velocidad media detrás de un solo rotor (imagen izquierda) se ve como este adopta una forma circular y simétrica a una distancia  $0,1D_{hélice}$ , mientras que para el caso de dos rotores (imagen derecha) este campo circular se deformará adquiriendo “forma de gota” debido a la perturbación del flujo del rotor cercano. En este caso de dos rotores se ha de señalar también otro fenómeno, como la aparición de una región de separación. Dentro de dicha región los dos rotores generarían un flujo ascendente constante que interactúa con el flujo radial del rotor, lo que resulta en una separación del flujo como se muestra en la esquina superior derecha.

A medida que el flujo se mueve aguas abajo hasta el plano  $Z/D_{hélice} = 1,0$ , como se muestra en la Ilustración 76, se aprecia como la forma circular anterior para el caso de un solo rotor se ha deformado hasta parecer una forma de “herradura”. Debido a la inercia del flujo, la corriente de aire después de haber sido acelerada por el paso de la hélice continuará girando a medida que avanza aguas abajo. Por lo que se encontró que la orientación del contorno de velocidad

estaba girada aproximadamente  $35^\circ$  desde su posición vertical original (es decir,  $Z/D_{hélice} = 0,1$ )[50].

Para el caso de dos rotores a una distancia  $Z/D_{hélice} = 1,0$ , este giro que se ha sufrido para el caso de un solo rotor será muy similar, sin embargo, el contorno de velocidad y el núcleo del vórtice se verán ligeramente atraídos por el rotor adyacente, especialmente en la región de separación de flujo señalada en la imagen. Esto se cree que está estrechamente relacionado con el efecto Coanda mencionado anteriormente.

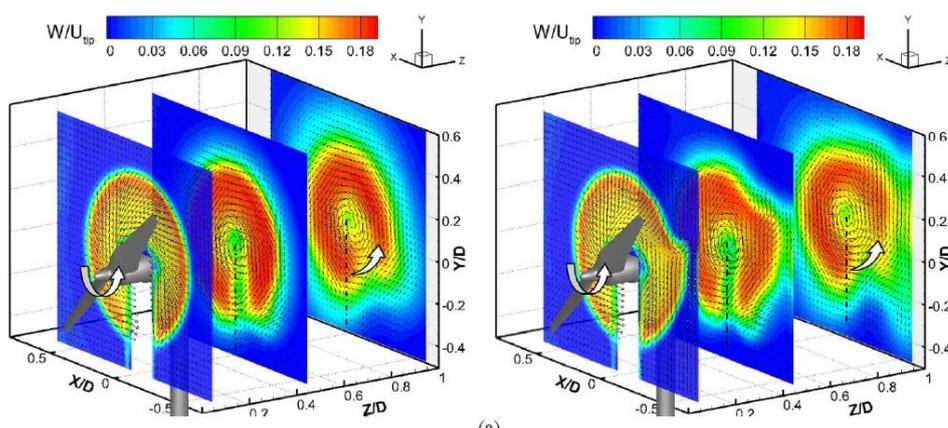


Ilustración 77.-Resultados SPIV medidos del campo de velocidad medio para las configuraciones de rotor único (izquierda) y rotor doble (derecha,  $L = 0,05D_{hélice}$ ) en las localizaciones  $Z/D_{hélice} = 0,1, 0,5, 1,0$ , fuente [53]

En esta ilustración donde se muestra la evolución de la velocidad en tres ubicaciones típicas en el sentido de la corriente (es decir,  $Z/D_{hélice} = 0,1, 0,5, 1,0$ ), se puede observar como a medida que el flujo inducido se desplaza aguas abajo, los campos de velocidad promedio, en ambos casos, se volvieron más uniformes debido a la reducción del área de flujo. Además, se vuelve a mostrar que en  $Z/D_{hélice} = 1,0$ , la orientación de los flujos inducidos está girada  $35^\circ$  aproximadamente con respecto a su posición inicial.

En base a estas medidas estereoscópicas se puede llegar a decir que el flujo pierde considerablemente intensidad a medida que se desarrolla aguas abajo, llegando a ser más uniforme.

Para continuar con el estudio del flujo en vuelo estacionario, se probará además de su campo de velocidades, su vorticidad gracias a los resultados aportados por el estudio [53]. La principal ventaja de mostrar este estudio es que se muestran resultados con los cuatro rotores en acción.

Como aeronave de estudio de esta investigación [53], se ha utilizado el UAV Syma X8C cuyas hélices, al igual que en los ejemplos vistos anteriormente, tienen un diámetro de 240mm.

Se ha de mencionar que las aeronaves de estudio de las siguientes investigaciones [53] y [50] tienen unas dimensiones muy similares, pero no iguales, por ello los resultados de flujo pueden ser comparables, pero no totalmente equiparables.

Además, en esta fuente [53] se han apoyado en la herramienta CFD de XFlow, el cual a diferencia de la mayoría de los programas de CFD, su resolución en la simulación no se basa en el malla, si no que utiliza otro tipo de configuraciones donde no existen pasos manuales o semimanuales suponiendo esto una mejora considerable en la resolución de los resultados. Con esta

metodología se pueden obtener finalmente dos tipos de resoluciones, resolución fija y resolución adaptativa.<sup>4</sup>

Para llevar a cabo la resolución fija a continuación presentada, se han realizado cinco regiones cilíndricas de refinamiento. Cuatro de ellas designadas para cada rotor con una dimensión de 280mm de diámetro y 40 mm de altura (con una resolución de 2 mm) y un último que albergará a toda la aeronave con unas medidas de 350 mm de diámetro y 200mm de altura (con una resolución de 4mm).

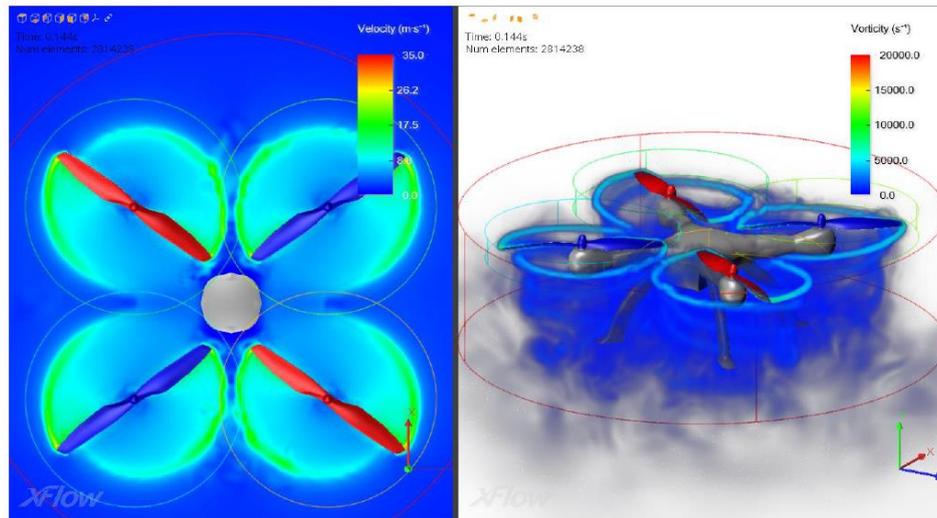


Ilustración 78.- Plano de corte vertical a través del plano de las palas del rotor, que muestra la velocidad (izquierda) y el gráfico volumétrico de vorticidad (derecha) para el caso de resolución fija, fuente [53]

En estos resultados se puede evidenciar que las regiones de mayor velocidad se encuentran en las zonas cercanas a las puntas de pala de las hélices de los rotores. Con la imagen situada a la izquierda no se puede afirmar como se desarrollan estos campos de velocidades aguas abajo de los rotores, pero para eso se han estudiado las medidas SPIV mostradas anteriormente.

Por otro lado, en cuanto a la evolución de la vorticidad, es en este ejemplo donde queda más claro su desarrollo aguas abajo y más en presencia de cuatro rotores. Se puede apreciar como para el valor aproximado de 200 mm, es decir la altura del cilindro mayor de refinamiento, esta vorticidad se puede empezar a considerar como despreciable alcanzando valores nulos.

Con estos resultados junto con los obtenidos de las medidas SPIV, se podría llegar a la conclusión de que, para un vuelo estacionario, sin presencia de viento y teniendo en cuenta que el diámetro de la hélice de los rotores es de 240 mm, una buena aproximación sería que el flujo dejaría de tener un carácter turbulento a una distancia aproximada de  $1D_{hélice}$ .

Para el caso de vuelo en avance, volviendo a los apartados 10.3.2.2 y 10.3.2.3 donde se analizan los resultados obtenidos a partir del estudio del flujo desarrollado en este modo de vuelo, se ve cómo con la presencia de una velocidad inicial de 10 m/s, una distancia aproximada donde el flujo deja de ser considerablemente turbulento es de nuevo de  $1D_{hélice}$ .

<sup>4</sup> El resultado obtenido a través de la resolución adaptativa no ha sido mostrado en este informe, ya que como el propio estudio [53] indica este modelo queda mal resuelto con este tipo de resolución.

El hecho de que la distancia donde la estela sea despreciable desde la hélice sea la misma para los casos de vuelo estacionario y en avance, no quiere decir que la distancia de seguridad entre cuerpos de las aeronaves vaya a ser la misma para ambos modos de vuelo.

### 10.5. Cálculo de distancias

Para el cálculo de distancias entre sUAS se tomarán como referencia las conclusiones sacadas en los apartados anteriores.

Por un lado, a partir de las medidas SPIV y los resultados del estudio [53] se ha visto cómo se comporta el flujo aguas abajo de la hélice y el alcance que este puede llegar a tener en vuelo sostenido.

Sin embargo, gracias a la aportación del estudio [51] y sus resultados PIV se puede conocer la evolución del flujo en vuelo en avance.

No obstante, aunque las condiciones iniciales y los modos de vuelo son diferentes, se realizará una comparación entre el caso de estudio de vuelo en avance y el caso de vuelo estacionario dándole a este último un ángulo de inclinación de  $10^\circ$  para que sean comparables.

#### 10.5.1. Distancias de seguridad en vuelo en avance con velocidad inicial de 10 m/s y $10^\circ$ de inclinación

De acuerdo con las deducciones sacadas a partir del estudio científico [51], una distancia válida en la que la turbulencia del flujo se puede comenzar a considerar como despreciable se encontraría en un valor próximo a  $1D_{hélice}$ .

A continuación, se mostrará como esta conclusión podría ser aplicada entre dos aeronaves utilizando como sUAV de estudio el utilizado en las literaturas [51] y [50]. Además, se contará con los  $10^\circ$  de inclinación para que los resultados del estudio [51] sean aplicables a estos cálculos.

Siendo conocedor de esto y de las dimensiones de los componentes del sUAV de estudio (revisar apartado 10.1.1) se pasará al estudio geométrico de la estela generada.

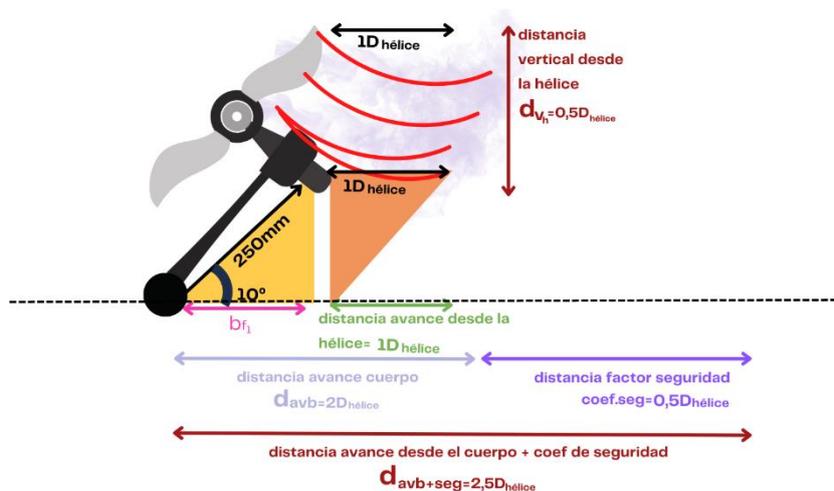


Ilustración 79.- Geometría de un rotor en vuelo en avance, elaboración propia

En primer lugar, se calculará la distancia horizontal entre el cuerpo de la aeronave y el rotor inclinado  $b_{f1}$ .

$$b_{f1} = 250 \cdot \cos(10^\circ) = 246,2 \text{ mm} \quad (11)$$

Una vez conocida esta incógnita, se le sumará la distancia de avance de la estela desde la hélice, es decir el valor de  $1D_{hélice}$ , que de acuerdo con esta aeronave de estudio  $D_{hélice} = 240\text{mm}$ , por lo que la distancia de avance desde el cuerpo quedaría como

$$d_{av_b} = b_{f1} + 1D_{hélice} = 246,2 + 240 = 486,2 \text{ mm} \approx 2D_{hélice} \quad (12)$$

Este resultado, podría ser aproximado a un valor de  $2D_{hélice}$ . Sin embargo, esta distancia solo representa el alcance que tendría la estela. Por ello, con el fin de dar una mayor seguridad a la operación, se le añadirá un coeficiente de seguridad de  $0,5D_{hélice}$ , es decir, un valor igual al radio de la hélice.

$$d_{av_{b+seg}} = d_{av_b} + coef_{seg} = 2D_{hélice} + 0,5D_{hélice} = 2,5D_{hélice} \quad (13)$$

Para calcular la distancia horizontal cuerpo-cuerpo entre aeronaves, se ha de tener en cuenta la distancia de avance con su coeficiente de seguridad y la distancia horizontal del segundo vehículo entre su propio cuerpo y su respectivo rotor de ataque

$$d_{h_{2^o b}} = b_{f1} + 0,5D_{hélice} = 246,2 + 120 = 366,2\text{mm} \approx 1,5D_{hélice} \quad (14)$$

Por lo que en cuanto a distancias horizontales se podría concluir con que una distancia de seguridad aceptable entre cuerpos de aeronaves podría ser igual a

$$d_{av_{b-b}} = d_{av_{b+seg}} + d_{h_{2^o b}} = 2,5D_{hélice} + 1,5D_{hélice} = 4D_{hélice} \quad (15)$$

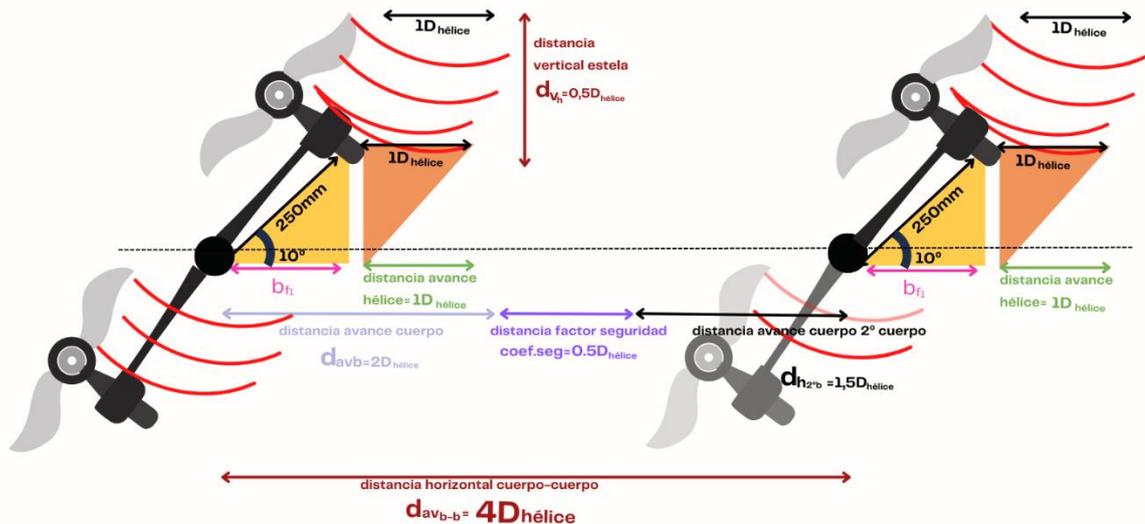


Ilustración 80.- Distancias de seguridad entre sUAS en vuelo en avance, elaboración propia

En cuanto a la distancia vertical habrá que acudir a la Ilustración 69 expuesta anteriormente donde se muestran los resultados del campo de velocidades de una aeronave en avance. En esta

se puede ver como su alcance vertical ronda una distancia entre  $0,8R_{hélice}$  y  $1R_{hélice}$ , lo que se traducirá como  $0,5D_{hélice}$ . Ante la falta de datos de la evolución de dicha estela en una distancia mayor se tomarán estos datos como referencia.

Para definir una distancia lateral de seguridad entre carriles del mismo sentido, se debería de conocer la influencia del viento en varias direcciones, pero ante la falta de estudios y de datos, se aproximará a una distancia igual a  $d_{avb-b}$ . Es muy probable que esta distancia pueda ser excesiva, ya que el factor de seguridad en este caso se podría ver reducido puesto que en el caso lateral no se cuenta con la inercia de avance del sUAV. Por otro lado, para la distancia lateral entre carriles de distintos sentidos, no se escatimará en distancia de seguridad y se le dará un valor de  $4,5D_{hélice}$ . Esto es así ya que bastante importante diferenciar los sentidos de circulación entre carriles, para que en caso de problemas de seguridad exista un margen de mitigación.

A continuación, se presentará una tabla con todas las distancias de seguridad declaradas para este caso de estudio

*Tabla 4.- Distancias de seguridad declaradas para vuelo en avance, elaboración propia*

<b>Distancia horizontal entre cuerpos de sUAVs</b>	$d_{avb-b} = 4D_{hélice}$
<b>Distancia vertical desde la hélice (inferior)</b>	$d_{vh} = 0,5D_{hélice}$
<b>Distancia lateral entre carriles del mismo sentido</b>	$d_{lms} = 4D_{hélice}$
<b>Distancia lateral entre carriles de distinto sentido</b>	$d_{lds} = 4,5D_{hélice}$

Estas distancias calculadas serán aplicadas durante toda la operación de las aeronaves a excepción de la entrada y salida a vertipuertos.

#### *10.5.2. Distancias de seguridad en vuelo sostenido con un ángulo de inclinación de 10°*

Dado que la amplia mayoría de estudios se centra en la evolución del flujo en vuelo estacionario, el número de resultados y el conocimiento sobre él es mayor que en el caso de vuelo en avance. Con el fin de poder comparar con el caso anterior, se planteará realizar un estudio geométrico en este modo de vuelo, pero con la condición de un ángulo de inclinación de 10°.

De nuevo, como se ha referenciado en apartados anteriores, en este caso una distancia aceptable donde el flujo deja de tener una influencia considerable podría ser igual que en el caso de vuelo en avance de  $1D_{hélice}$ .

En este caso con velocidad inicial nula, se puede decir que el flujo saliente de la hélice es perpendicular a esta, por lo que la geometría de la estela quedaría como:

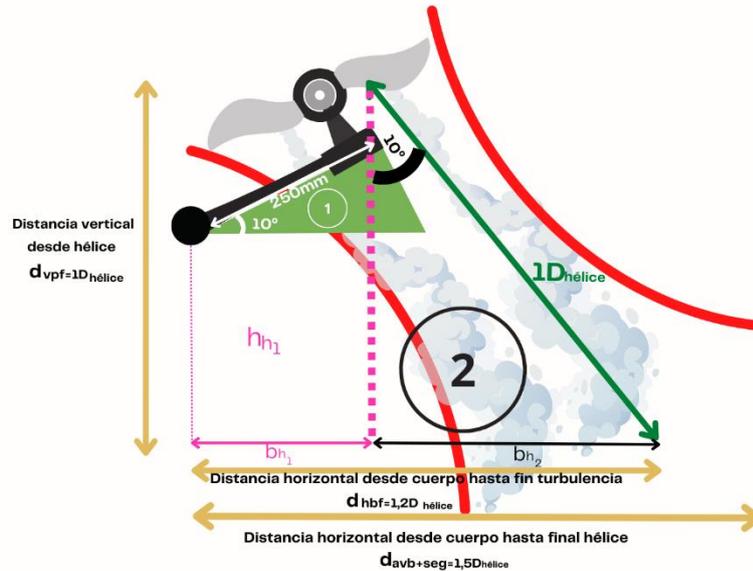


Ilustración 81.- Geometría de un rotor inclinado en vuelo sostenido, elaboración propia

Partiendo del primer triángulo rectángulo (representado en verde), este se puede dividir en otros dos triángulos rectángulos de donde nacerán todas las variables de trabajo de este caso. Del triángulo rectángulo 1 situado a la izquierda, se obtendrá el valor de  $b_{h1}$ , es decir, el valor de la distancia horizontal desde cuerpo hasta el rotor con esta inclinación de  $10^\circ$ .

$$b_{h1} = 250 \cdot \cos(10^\circ) = 246,2mm \quad (16)$$

En cuanto al triángulo citado como 2, se podrá conocer a través de él la distancia vertical y horizontal que puede alcanzar el flujo perturbado desde la hélice con las variables  $h_{h1}$  y  $b_{h2}$  respectivamente. Conociendo que el valor de la hipotenusa, en este caso es de  $1D_{hélice}$  y  $D_{hélice} = 240 mm$  de acuerdo con el dron de estudio de las investigaciones [51] y [50], el resto de las variables se calcularán haciendo uso de las razones trigonométricas

$$h_{h1} = 240 \cdot \cos(10^\circ) = 236,35mm \quad (17)$$

$$b_{h2} = 240 \cdot \sin(10^\circ) = 41,68mm \quad (18)$$

A continuación, se calculará la distancia horizontal total desde el cuerpo de la aeronave y hasta el punto aproximado donde el flujo turbulento se puede considerar como despreciable,  $d_{hb}$ .

$$d_{hb} = b_{h1} + b_{h2} = 246,2 + 41,68 = 287,88mm \approx 1,2D_{hélice} \quad (19)$$

Además, se conoce del caso anterior que la distancia entre el cuerpo y el final de la hélice de esta aeronave de estudio inclinada es de aproximadamente  $1,5D_{hélice}$ . Finalmente se optará por tomar esta distancia como referencia con el fin de añadir un pequeño margen de seguridad.

Como ha ocurrido en el caso anterior, estas distancias horizontales se deberán de aplicar entre dos aeronaves en avance, por lo que se deberá de considerar la distancia horizontal de la hélice de ataque y cuerpo de la segunda aeronave en acción, además de un coeficiente de seguridad entre sUAVs quedando como resultado

$$d_{avb-b} = d_{avb+seg} + cof_{seg} + d_{h_2^{\circ}b} = 1,5D_{hélice} + 0,5D_{hélice} + 1,5D_{hélice} = 3,5D_{hélice} \quad (20)$$

En este caso la distancia horizontal entre cuerpos quedaría con un resultado aproximado de  $3,5D_{hélice}$ .

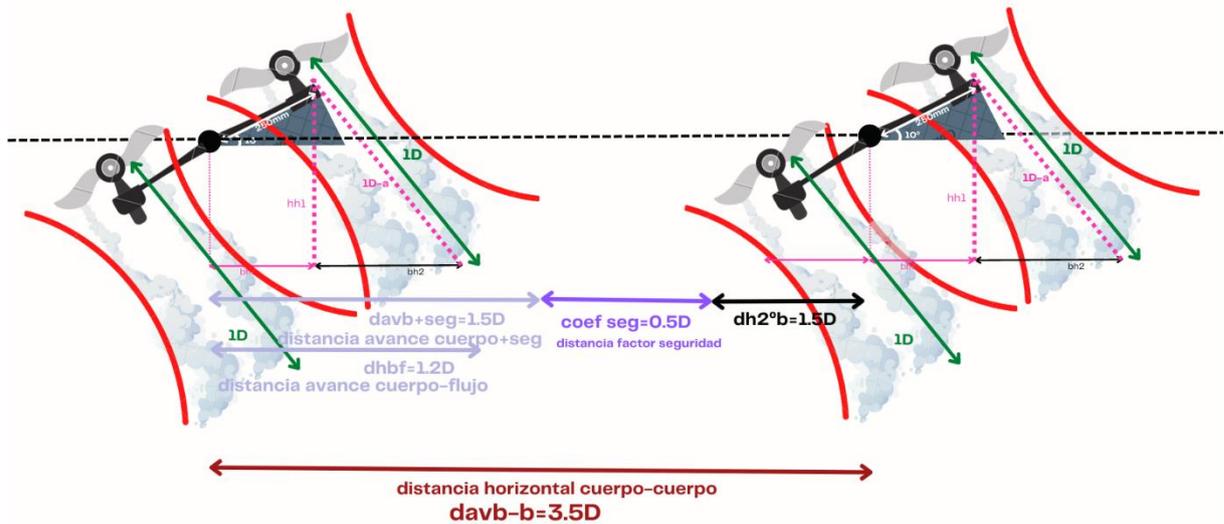


Ilustración 82.- Distancias de seguridad entre sUAS en vuelo sostenido con un ángulo de inclinación de  $10^{\circ}$ , elaboración propia

Para la distancia vertical de influencia de la estela desde la hélice,  $d_{v_{pf}}$ , se hará uso de la incógnita  $h_{h1}$  ya calculada, la cual se aproximará a un coeficiente

$$d_{v_{pf}} = h_{h_1} = 236,35mm \approx 1D_{hélice} \quad (21)$$

Por último, para las distancias laterales en este caso, se estimarán de nuevo en base a la distancia en avance entre cuerpos por ser esta la distancia de mayor magnitud y mantener así el mismo criterio que para el caso anterior. La distancia lateral entre carriles del mismo sentido será igual a  $3,5D_{hélice}$ , mientras que para carriles de distintos sentidos se incrementará esta distancia en  $0,5D_{hélice}$ , para evitar en un futuro problemas de seguridad.

Tabla 5.- Distancias de seguridad declaradas para vuelo sostenido, elaboración propia

Distancia horizontal entre cuerpos de sUAVs	$d_{avb-b} = 3,5D_{hélice}$
Distancia vertical desde la hélice (inferior)	$d_{v_h} = 1D_{hélice}$
Distancia lateral entre carriles del mismo sentido	$d_{lms} = 3,5D_{hélice}$
Distancia lateral entre carriles de distinto sentido	$d_{lds} = 4D_{hélice}$

Estas distancias serán las utilizadas para el caso de entrada y salida a vertipuertos.

### 10.5.3. Comparativa entre las distancias de seguridad calculadas para los casos en vuelo sostenido y en avance

Si se realiza una comparación entre los casos expuestos, se puede apreciar como para el caso de vuelo en avance la distancia horizontal tiene un mayor alcance que para el vuelo sostenido. Esto es principalmente causado por la presencia de la velocidad inicial de  $10m/s$  cuya dirección coincide con la dirección del movimiento de las aeronaves.

Sin embargo, para el alcance vertical del flujo turbulento sucede lo contrario, es en el caso de vuelo sostenido donde se llega a un mayor valor. Esto se debe a que el flujo de salida tiende a evolucionar aguas abajo de manera perpendicular con respecto a la hélice, ya que para el caso de vuelo en punto fijo la velocidad inicial es nula y, por tanto, no lo perturba el flujo en ninguna dirección.

Finalmente, se ha decidido estudiar ambos casos, porque, aunque parezca que el estudio de vuelo avance aporte información más valiosa para este estudio, esto no es así puesto que las distancias declaradas para ambos casos serán empleadas en distintos momentos a lo largo de la operación, como se ha mencionado anteriormente.

Se ha de destacar que para el caso de vuelo en punto fijo el número de estudios encontrados es mayor y, por tanto, el número de datos también, aportando esto una mayor veracidad a los resultados. Sin embargo, para el caso de vuelo en avance el número de estudios es muy limitado estando los resultados aportados por estos poco contrastados, haciendo que la fiabilidad del modelo se reduzca. Esta reducción de fiabilidad se ha intentado paliar mediante la introducción de amplias distancias de seguridad.

De todos modos, quedarían varios trabajos pendientes para realizar en el futuro, como modelar distintos tipos de UAV, calcular resultados para otros valores de ángulos de inclinación e incluso cómo afectarían los vientos a la aeronave.

En base a una futura maduración del sistema y una mayor investigación que lo pruebe, las medidas calculadas en este informe probablemente se verán modificadas con el fin de ser optimizadas.

### 10.6. Errores cometidos

Ante la falta de disponibilidad de datos aerodinámicos y detalles en las importaciones de CAD, se han provocado ciertos errores en los resultados de los estudios anteriores.

De acuerdo con el estudio [53], sin duda, se podrían haber ejecutado casos de resolución más fina, pero, dado que no hay datos experimentales con los que comparar estos resultados, se consideró posponer un estudio de resolución completa hasta que haya un caso disponible con datos experimentales para comparar.

Toda esta falta de datos crea la necesidad de realizar trabajos en la investigación del comportamiento de este tipo de aeronaves, por ello hay planes para modelar un UAV comercial más grande para el cual se espera que la NASA disponga de datos precisos de pruebas de túnel de viento y geometría probada.

Aunque se ha de hacer mención de que recientemente se probaron varios UAV multirrotores en un túnel de viento en el Centro de Investigación Ames de la NASA [54]. Ya se han presentado datos limitados y pronto se publicarán más en un informe técnico completo.

Además, el propio artículo de Russell [54] indica que se está realizando un trabajo adicional en la NASA para ayudar a caracterizar el comportamiento de estas aeronaves, incluida la realización de análisis CFD de uno o más de los UAVs, probablemente utilizando OVERFLOW y el método de cuadrícula invertida.

Mientras tanto, los modelos nomenclaturales expuestos en este informe se pueden usar para ilustrar el proceso de modelado, el flujo de trabajo y los resultados que pueden ser obtenidos con un hardware relativamente modesto y un tiempo de ingeniería muy limitado.

Por último, se ha de mencionar que no se ha planteado la realización de un análisis CFD para el cálculo de distancias entre UAVs dada la falta de datos experimentales y de detalles de CAD de las aeronaves mencionados anteriormente. Por ello se ha querido dar solución al problema en base a los resultados obtenidos en diversos estudios científicos ya existentes.

## Capítulo XI

# 11. DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS AÉREAS EN LA CIUDAD DE ALMERÍA PARA sUAS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

## 11.1. Declaración de medidas de seguridad de acuerdo con el diámetro del UAV

Con el fin de una mejora en la operativa, las distancias declaradas en el apartado anterior serán adaptadas para ser referenciadas de acuerdo con el diámetro del UAV en lugar del de sus hélices, facilitando así la labor de los controladores y operadores para conocer qué distancias de seguridad mantener de acuerdo con la aeronave en activo.

Para poder establecer una equivalencia entre  $D_{hélice}$  y  $D_{UAV}$ , se han estudiado las dimensiones de varias aeronaves con el propósito de poder comprobar si se puede llegar a una relación genérica entre coeficientes. Se comenzará mostrando el procedimiento de cálculo tomando como ejemplo el modelo Drone Volt Hércules 20 fabricado por la compañía Drone Volt para el transporte de mercancías pesadas, está diseñado para transportar hasta un máximo de 15 kg de carga de pago.

De acuerdo con la ficha técnica aportada por el fabricante [55], esta aeronave tiene una longitud de 1000 mm, sin tener en cuenta las hélices cuyos diámetros miden 660 mm de punta a punta.

Por lo tanto, sumando a lado y lado del cuerpo de la aeronave el valor del radio de la hélice, es decir 330 mm por lado, la dimensión final alcanzaría un valor de 1660 mm, siendo esta la medida a tener en cuenta como diámetro del dron equivalente.

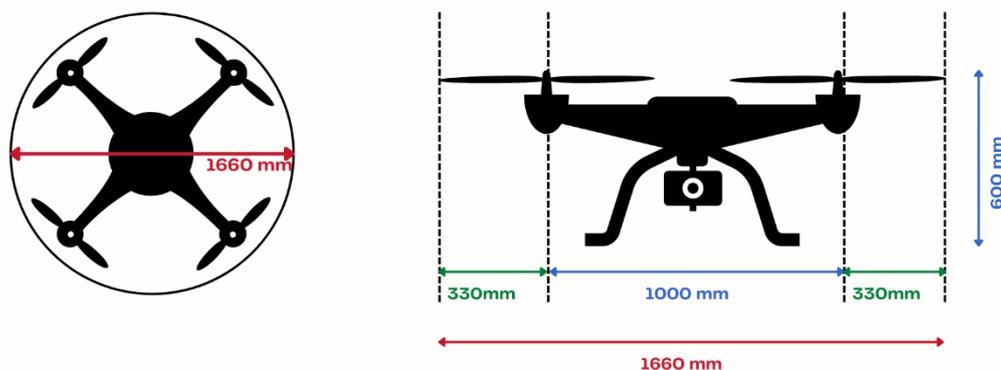


Ilustración 83.- Cálculo de diámetro equivalente de dron aplicado al modelo Hércules 20, elaboración propia

Este método será repetido para el resto de los casos, ya que cuando los fabricantes muestran las medidas de las aeronaves, como ellos mismos indican en sus informes, no se tienen en cuenta el tamaño de las hélices. Por ello se deberá siempre conocer el valor de las medidas del cuerpo

del UAV, así como el tamaño de las hélices que monta, ya que una misma aeronave puede montar distintos modelos de hélice, por ello, siempre se ha indicado el tamaño de las hélices que se estén utilizando.

Retomando el caso del UAV Hércules 20, conociendo que  $D_{hélice} = 660 \text{ mm}$  y  $D_{UAV} = 1660 \text{ mm}$ , y relacionando ambos valores se podría decir que:

$$\frac{1660}{660} = 2,5 \quad \rightarrow \quad 2,5D_{hélice} = D_{UAV} \quad (22)$$

Obteniendo así finalmente la relación entre diámetros para esta aeronave de estudio.

Una vez realizado este primer ejemplo, se mostrará una tabla comparando el caso de distintos modelos UAVs característicos para cada categoría de peso y tamaño utilizando el mismo procedimiento.

Tabla 6.- Comparativa entre distintos modelos de UAVs con el objetivo de mostrar la relación entre sus diámetros

Modelo UAV	$D_{hélice}$	$D_{estructura}$	$D_{UAV}$	Cálculos ( $D_{UAV}/D_{hélice}$ )	Relación
<i>Drone Volt Hercules 20</i>	660 mm	1000 mm	1660mm	$\frac{1660}{660} = 2,5$	$2,5D_{hélice} = D_{UAV}$
<i>FDG815 Small Quadcopter Drone</i>	560 mm	670 mm	1230 mm	$\frac{1230}{560} = 2,2$	$2,2D_{hélice} = D_{UAV}$
<i>SYMA X8C</i>	240 mm	350 mm	590 mm	$\frac{590}{240} = 2,5$	$2,5D_{hélice} = D_{UAV}$

Tras haber analizado las dimensiones de tres modelos de drones de diferentes tamaños, se ha llegado a la conclusión de que una buena aproximación para relacionar los diámetros de las hélices con los de las aeronaves de forma generalizada podría ser finalmente

$$2,5D_{hélice} = D_{UAV} \quad (23)$$

El operador será el encargado de que montar un tamaño de hélice adecuado a cada estructura con el fin de que esta relación se cumpla.

Una vez conocida esta correlación, se podrán adaptar las medidas ya declaradas en el apartado anterior en  $D_{hélice}$  a  $D_{UAV}$  sin problema, quedando como resultado final el mostrado en las siguientes tablas.

## DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS AÉREAS EN LA CIUDAD DE ALMERÍA PARA sUAS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

Tabla 7.- Distancias de seguridad expresadas en DUAV para vuelo en avance, elaboración propia

Distancia horizontal entre cuerpos de sUAVs	$d_{avb-b} = 4D_{hélice}$	$d_{avb-b} = 1,6D_{UAV}$
Distancia vertical desde la hélice (inferior)	$d_{vh} = 0,5D_{hélice}$	$d_{vh} = 0,2D_{UAV}$
Distancia lateral entre carriles del mismo sentido	$d_{lms} = 4D_{hélice}$	$d_{lms} = 1,6D_{UAV}$
Distancia lateral entre carriles de distinto sentido	$d_{lds} = 4,5D_{hélice}$	$d_{lds} = 1,8D_{UAV}$

Tabla 8.- Distancias de seguridad expresadas en DUAV para vuelo en punto fijo, elaboración propia

Distancia horizontal entre cuerpos de sUAVs	$d_{avb-b} = 3,5D_{hélice}$	$d_{avb-b} = 1,4D_{UAV}$
Distancia vertical desde la hélice (inferior)	$d_{vh} = 1D_{hélice}$	$d_{vh} = 0,4D_{UAV}$
Distancia lateral entre carriles del mismo sentido	$d_{lms} = 3,5D_{hélice}$	$d_{lms} = 1,4D_{UAV}$
Distancia lateral entre carriles de distinto sentido	$d_{lds} = 4D_{hélice}$	$d_{lds} = 1,6D_{UAV}$

Finalmente, como se mencionó al principio de este apartado, las distancias utilizadas por los operadores serán las expresadas en el diámetro de la aeronave ya que facilitarán el orden de magnitud de las distancias a tomar entre aeronaves y estructuras aéreas.

### 11.2. Definición de dimensiones de las estructuras aéreas

Para realizar el dimensionamiento de las estructuras aéreas desarrolladas en la Zona II, se deberán de retomar las incógnitas descritas en el apartado 9, así como las declaradas en el apartado anterior, quedando así una tabla resumen de todas ellas.

Tabla 9.- Tabla resumen distancias declaradas en apartados anteriores para la definición de las estructuras aéreas desarrolladas en la Zona II, elaboración propia

Distancia horizontal entre cuerpos de sUAVs	$d_{avb-b} = 1,6D_{UAV}$
Distancia vertical desde la hélice (inferior)	$d_{vh} = 0,2D_{UAV}$
Distancia lateral entre carriles del mismo sentido	$d_{lms} = 1,6D_{UAV}$
Distancia lateral entre carriles de distinto sentido	$d_{lds} = 1,8D_{UAV}$
Ancho de capa = Ancho calle	$A_c = \sum d_{lms} + d_{lds} + D_{UAV} + dist.seg$
Altura de capa	$h_c = 1,5m$
Doble altura entre capas (solución dada para el caso de los cruces)	$h = 2h_c = 3m$
Distancia vertical entre capas	$d_v = h_{capa1} + h + h_{cdooblealtura} + h = 9m$

### 11.2.1. Distancias desarrolladas en el plano vertical

Para el caso de las distancias correspondientes con el plano vertical, es decir,  $h_c$ ,  $d_v$  y  $h$ , se darán valores fijos, es decir, no dependerán del tipo de aeronave, sino que será aplicado a todas las capas por igual.

En este caso, la distancia declarada anteriormente como  $d_{vh}$ , es decir la distancia de influencia vertical del flujo desde la hélice no tendrá demasiado valor en este caso, ya que ahora el factor limitante es el propio tamaño de la aeronave y, no tanto, la influencia vertical de su flujo, puesto que, como se ha comprobado, los valores de magnitud de este alcance son bastantes menores en comparación con la altura propia de la aeronave y su carga de pago.

Para la imposición del resto de distancias, se ha tomado como referencia algunas de las aeronaves de mayor tamaño que podrá albergar el sistema. Uno de estos casos son el modelo Wingcopter 178 Heavy Lift con una altura de 48 *cm* [36] a la cual se le ha añadido un valor de 103 *cm* para la altura de la carga de pago.

Otro ejemplo de multirroto de gran envergadura sería el modelo M600WP de Embetion [56] con una envergadura de 1650 *mm* y altura con carga de pago de 1493 *mm*.

Con el fin de calcular la altura de la estructura capa  $h_c$  se tendrán en cuenta las alturas de las aeronaves mencionadas con sus cargas de pago siendo estas su configuración de vuelo más limitante.

$$h_c = (\text{alt. UAV} + \text{alt. carga pago}) \cdot \cos(10^\circ) \quad (24)$$

Aplicando dicha expresión a los modelos mencionados [36][56], se obtendrá

$$\begin{array}{l} \text{Wingcopter 178} \\ \text{Heavy Lift} \end{array} \quad h_c = (1'51\text{m}) \cdot \cos(10^\circ) = 1,487 \text{ m} \quad (25)$$

$$\text{M600WP} \quad h_c = (1'493\text{m}) \cdot \cos(10^\circ) = 1,47 \text{ m} \quad (26)$$

Se ha demostrado que, para estos casos limitantes, debido a las dimensiones de las aeronaves, en ninguno de ellos se supera los 1,5 *m*, por lo que una buena aproximación para esta variable del sistema podría ser:

$$\text{Alt. capa} = h_c = 1,5 \text{ m} \quad (27)$$

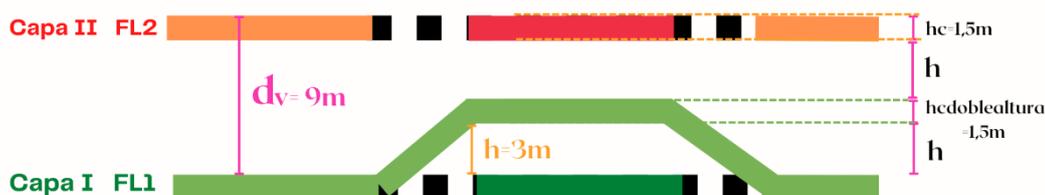
Como se ha mencionado anteriormente esta medida será fija, es decir, aunque el tamaño de las aeronaves disminuya con el paso de las capas, las distancias verticales entre ellas serán invariables.

Para definir la altura  $h$ , es decir, la altura alcanzada por la aeronave entre capas para solventar el problema de los cruces, por motivos de seguridad se estableció que esta altura fuera el doble de la altura de la capa, es decir, 3 *m* partiendo tanto de su parte superior como inferior.

Simplemente puedes decir, por motivos de seguridad se estableció que esta altura fuera el doble de la altura de la capa.

Para concluir con las distancias declaradas verticalmente, se podría decir que la distancia vertical entre capas será finalmente de 9m. Esto es así debido a la suma de las alturas de las capas y la distancia  $h$  declarada en la parte superior e inferior de la doble altura.

$$d_v = h_{capa1} + h + h_{c\text{doblealtura}} + h = 1,5 + 3 + 1,5 + 3 = 9m \quad (28)$$



*Ilustración 84.- Declaración de la distancia vertical existente entre capas, elaboración propia*

Una vez conocidas el valor de todas estas incógnitas, se podrá calcular el número de capas que podrá albergar el sistema. Volviendo al apartado 7.4, se puede ver cómo la Zona II donde se lleva a cabo todo el desarrollo de estas estructuras aéreas, tiene una altura de 80 m para el caso de la ciudad de Almería, por lo tanto, conociendo esto y la distancia entre capas, es sencillo calcular el número de capas de las que se dispondrán:

$$\frac{80m}{9m} = 8,88 \approx \mathbf{8\ capas} \quad (29)$$

Finalmente, se podría decir que la zona II tiene capacidad para albergar hasta 8 capas, implicando esto por tanto 8 niveles de vuelo y donde podrán operar hasta 8 categorías distintas de UAS. Esto se puede considerar como una buena aproximación teniendo en cuenta que, en la actualidad, de acuerdo con la normativa europea [2] existen hasta 7 categorías distintas de UAS.

### *11.2.2. Distancias desarrolladas en el plano horizontal*

Para poder terminar de establecer el dimensionamiento de las estructuras aéreas habrá que conocer las distancias establecidas en el plano horizontal, entrando en juego las variables  $A_c$ ,  $d_{lms}$  y  $d_{lds}$ , así como el ancho de la calle y aeronave de la que se trate.

En contraste con las distancias verticales, estas sí que variarán y podrán ser modificables dependiendo del caso de estudio. Por ejemplo, en una misma calle donde las capas se encuentran sobrepuestas una sobre otras, el número de carriles disponibles en cada capa dependerá del tamaño de las aeronaves que circulen por ella.

Para clarificar esto, se expondrá un caso de un cruce real en la ciudad de Almería con sUAS de distintos tamaños dedicados al transporte de mercancías.

En primer lugar, se mostrará la ubicación y la geografía del cruce escogido. Este se encuentra localizado dentro de la zona de estudio expuesta en el apartado 8.4. Además, está en una zona clave para el transporte de mercancías, ya que se sitúa dentro del núcleo económico y mercantil de la ciudad de Almería.

# Integración de sistemas aéreos no tripulados para el transporte de mercancías en el espacio aéreo urbano de la ciudad de Almería

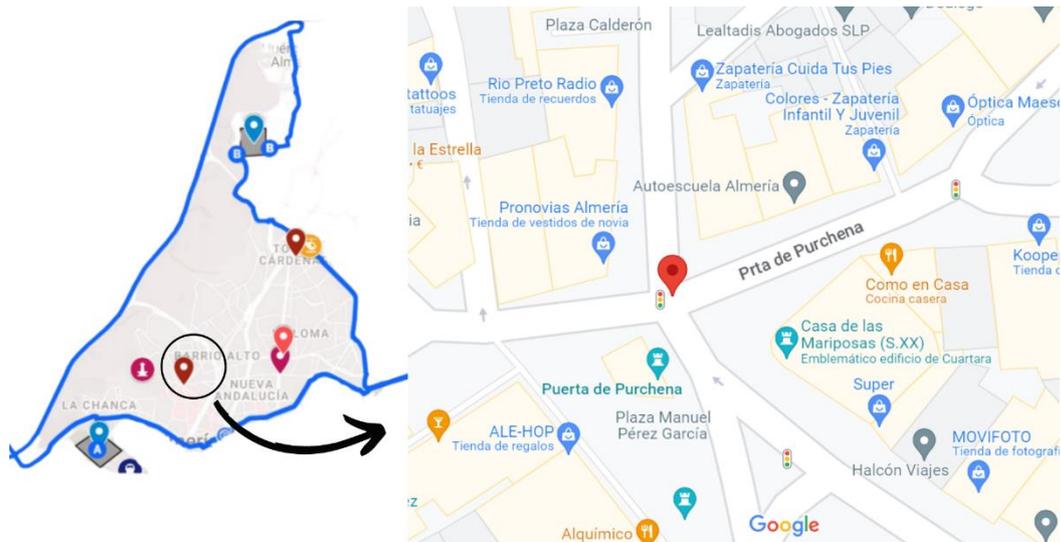


Ilustración 85.- Cruce ejemplar dentro de la zona estudio y con gran interés mercantil y económico

Tras conocer su localización, se han medido la anchura de las calles implicadas en el cruce obteniendo un resultado de 6m aproximadamente en todas ellas.

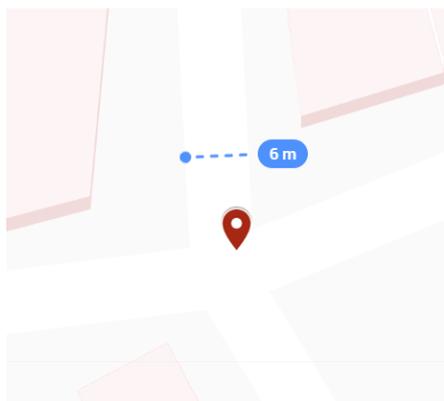


Ilustración 86.- Distancia de ancho de calle de Avenida Pablo Iglesias, elaborado con GoogleMyMaps

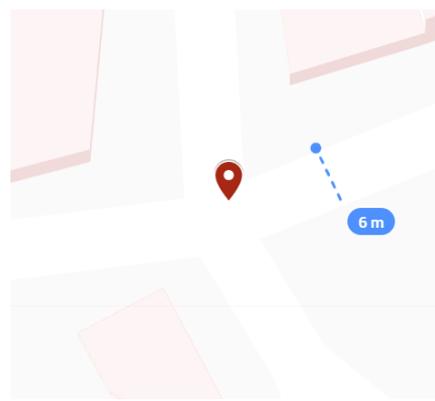


Ilustración 87.- Distancia de ancho de calle Puerta Purchena, elaborado con GoogleMyMaps

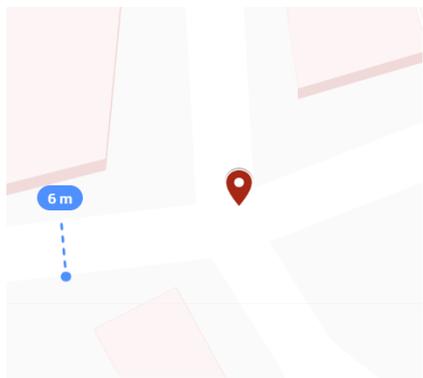


Ilustración 88.- Distancia de ancho de calle de Puerta Purchena, elaborado con GoogleMyMaps

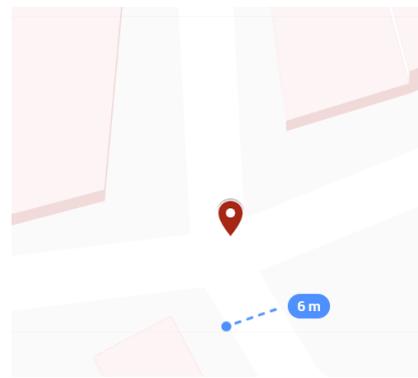


Ilustración 89.- Distancia de ancho de calle de Paseo de Almería, elaborado con GoogleMyMaps

Una vez conocidas las dimensiones de las calles implicadas, lo son también las anchuras de las capas correspondientes con cada una de ellas.

A continuación, se analizará el caso de una de estas calles señaladas para el cálculo de carriles disponibles que habrá en 3 capas diferentes donde volarán tres tamaños distintos de aeronaves.

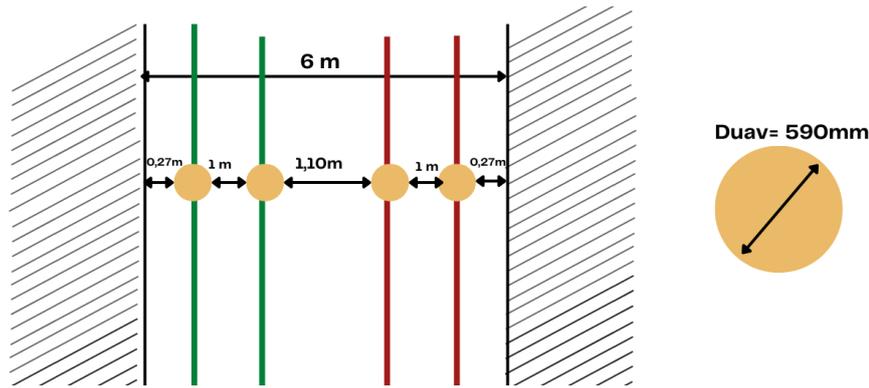
Se comenzará por analizar la aeronave de menor tamaño de los modelos vistos anteriormente, el Syma X8C, el cual tiene un  $D_{UAV} = 590 \text{ mm}$  [57], y cuyas distancias laterales de seguridad correspondientes quedarían como

$$d_{lms} = 1,6D_{UAV} = 1,6 \cdot 590 = 944 \approx 1000 \text{ mm} = 1,0 \text{ m} \quad (30)$$

$$d_{lds} = 1,8D_{UAV} = 1,8 \cdot 590 = 1062 \approx 1100 \text{ mm} = 1,1 \text{ m} \quad (31)$$

Los resultados obtenidos en el desarrollo de las distancias horizontales serán siempre redondeados al alza en decímetros, aumentando esto los márgenes de seguridad. Además, se ha determinado esta magnitud ya que debido a la envergadura de estas estructuras aéreas y la propia maniobrabilidad de estas aeronaves llegar a una precisión menor no sería posible debido a la tolerancia de los datos antes expuestos.

Teniendo esto en cuenta y que  $A_c = 6 \text{ m}$ , el resultado quedaría como el mostrado en la siguiente ilustración.



*Ilustración 90.- Número de carriles disponibles para el sUAV SymaX8C en una calle de 6m de ancho, elaboración propia*

Como se puede apreciar el número total de carriles para este caso es de cuatro. Como ya se indicó el número de carriles entre ambos sentidos debe ser el mismo por lo que este número deberá de ser siempre par. A excepción de las aeronaves de gran envergadura localizadas en las capas superiores del sistema donde sí se permitirá la existencia de un único carril.

$$A_c = d_{limcapa} + D_{UAV} + d_{lms} + D_{UAV} + d_{lds} + D_{UAV} + d_{lms} + D_{UAV} + d_{limcapa} = 6 \text{ m} \quad (32)$$

Además, se ha de tener en cuenta que, para este caso, por ejemplo, la distancia de seguridad entre carriles y los límites de capa  $d_{limcapa} = 0,27 \text{ m}$  a cada lado. Esto resulta de la diferencia entre el ancho de la capa total y la dimensión de los carriles con sus respectivas distancias de seguridad, quedando un resultado de  $0,54 \text{ m}$ . Siendo este dividido entre dos lados, resulta finalmente en esta distancia de seguridad de  $0,27 \text{ m}$  por lado con respecto a los límites de capa.

Este factor de seguridad  $d_{limcapa}$  se ha de tener en cuenta para el diseño y dimensionamiento de carriles dentro de una capa, siendo este dotado de un valor mínimo en  $0,15 \text{ m}$  por lado para evitar percances con otras capas próximas lateralmente. Esta ha sido la distancia impuesta de acuerdo con el estudio realizado por la Universidad de Tokio sobre la precisión de vuelo de este

tipo de aeronaves [26]. Por lo tanto, aunque un número  $X$  de carriles se pueda albergar en una capa si la distancia hasta los límites de capa es menor de  $0,15\text{ m}$  por cada lado no será válido y se deberá de reducir el número de carriles calculados.

Para el siguiente caso de estudio, se utilizará el sUAS FDG815 con  $D_{UAV} = 1230\text{ mm}$  y una capacidad de carga de  $15\text{ kg}$  [58], cuyas distancias laterales de seguridad quedarían definidas como:

$$d_{lms} = 1,6D_{UAV} = 1,6 \cdot 1230 = 1968 \approx 2000\text{ mm} = 2,0\text{ m} \quad (33)$$

$$d_{lds} = 1,8D_{UAV} = 1,8 \cdot 1230 = 2214 \approx 2300\text{ mm} = 2,3\text{ m} \quad (34)$$

Se puede observar como para esta segunda aeronave las distancias de seguridad han aumentado prácticamente el doble en comparación con el sUAS Syma X8C, por lo que el número de carriles se debería de ver reducido de la misma manera, es decir debería de haber la mitad de los carriles en comparación con el caso anterior.

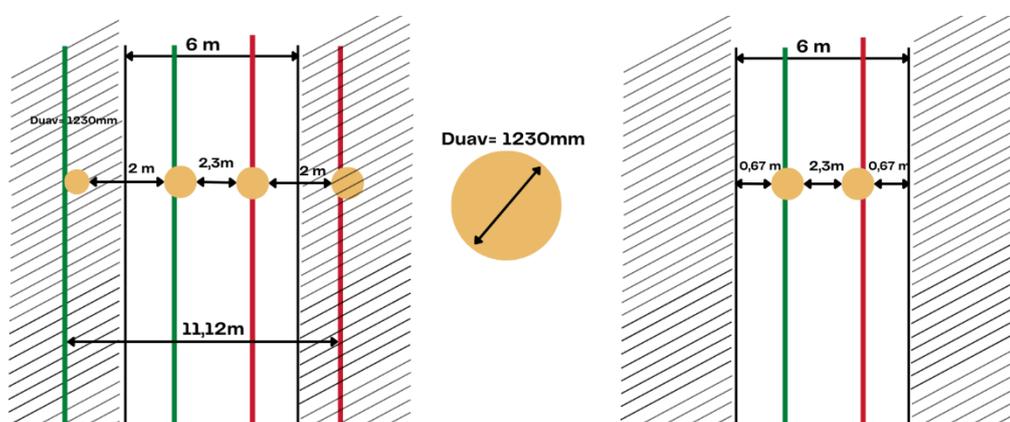


Ilustración 91.- Número de carriles disponibles para el sUAV FDG815 en una calle de 6m de ancho, elaboración propia

Tras observar la ilustración, se puede ver cómo en el caso de querer introducir 4 carriles esto no es posible ya que supera la dimensión del ancho de capa. Por tanto, la opción de diseño correcta y elegida sería la representada a la derecha de la imagen con tan solo 2 carriles.

Por último, como caso de mayor tamaño y por tanto de mayor limitación, se estudiará la aeronave Wingcopter 178 Heavy Lift con  $D_{UAV} = 1780\text{ mm}$  [36] y cuyas distancias de seguridad laterales quedarían expresadas como:

$$d_{lms} = 1,6D_{UAV} = 1,6 \cdot 1780 = 2848 \approx 2900\text{ mm} = 2,9\text{ m} \quad (35)$$

$$d_{lds} = 1,8D_{UAV} = 1,8 \cdot 1780 = 3204 \approx 3300\text{ mm} = 3,3\text{ m} \quad (36)$$

Su resultado gráfico quedaría como el aquí mostrado:

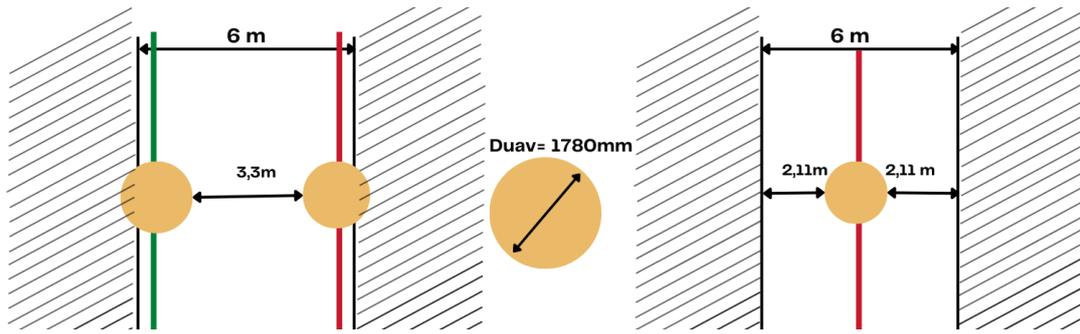


Ilustración 92.- Número de carriles disponibles para el sUAV Wingcopter 178 Heavy Lift en una calle de 6m de ancho, elaboración propia

En este caso, el número de carriles que se pueden crear es tan solo uno. Esto pone de manifiesto que no todas las calles podrán albergar a todo tipo de aeronaves. Es decir, es muy posible que en calles estrechas la circulación de aeronaves con envergadura similar al Wingcopter 178 no sea posible, ya que, o bien la propia aeronave no cabe, o bien no se cumplirían las distancias mínimas de seguridad entre aeronave y límite de capa.

Tras haber realizado el análisis de varias aeronaves de diversos tamaños se puede apreciar cómo es muy importante tener en cuenta las dimensiones de las calles y aeronaves que se vayan a utilizar para una operación, ya que a la hora de la realización de trayectorias en la movilidad aérea urbana no será siempre posible la utilización de la ruta óptima con la aeronave deseada.

Finalmente, se podría afirmar que el dimensionamiento de las estructuras aéreas puede llegar a ser variable según la aeronave y lugar del que se trate. Esto debe ser así con el fin de tener la capacidad de adaptarse a la geografía de una ciudad ya existente.

Sin embargo, sí que se podría alegar que hay variables que sí han quedado definidas definitivamente como la altura de las capas, así como el número de capas disponibles en la zona II dedicada a la movilidad aérea urbana, facilitando así la distribución de los distintos tipos de sUAS en esta propuesta de un nuevo espacio aéreo.

### 11.3. Distribución de sUAS en las distintas capas del sistema

Como se ha mostrado en el apartado anterior, el número total de capas que se puede albergar este sistema aplicado en la ciudad de Almería es de 8, apareciendo así ocho niveles de vuelo y siendo este el posible número de categorías en los que se podrían alojar los sUAV en la Zona II.

Sin embargo, para poder determinar las distintas categorías, previamente se clasificarán las aeronaves por tamaños. Para llevar a cabo esta tarea se realizarán una serie de cálculos tomando como referencia de ancho de calle y por tanto de capa un valor de 6 m, como el usado en el apartado anterior. Además, se respetará el coeficiente de seguridad mínimo entre la aeronave y el límite de capa de 0,15 m a cada lado de la capa.

$$A_c = d_{limcapa} + \sum D_{UAV} + \sum d_{lms} + d_{lds} + d_{limcapa} = 6m \quad (37)$$

En este caso, el factor limitante entre las distintas categorías será el número de carriles que se podrán establecer de acuerdo con las condiciones de  $A_c$  y coeficiente de seguridad ya mencionados.

- Nº de carriles ( $n_c$ )

$$\begin{aligned}
 A_c &= 0,2 + \sum_{i=1}^x D_{UAV} + \sum_{i=1}^{x/2} dlms + dlds + 0,2 = \\
 &= 0,2 + \sum_{i=1}^x D_{UAV} + \sum_{i=1}^{x/2} 1,6D_{UAV} + 1,8D_{UAV} + 0,2 = 6m
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Finalmente, aplicando distintos valores de  $n_c$ , según el estudio previo realizado a este respecto, se han obtenido hasta cuatro categorías distintas, mostradas a continuación:

Tabla 10.- Tabla resumen horquillas de tamaño de acuerdo con el número de carriles disponibles, elaboración propia

<b>6 carriles</b>	<b><math>D_{UAV} \leq 0,39m</math></b>
<b>4 carriles</b>	$0,39m < D_{UAV} \leq 0,85m$
<b>2 carriles</b>	$0,85m < D_{UAV} \leq 1,47m$
<b>1 carril</b>	$1,47m < D_{UAV} \leq 5,6m$

Teniendo en consideración esta distribución en cuatro grupos y conociendo que el número de capas disponibles es de 8, se le asignará a cada par de capas una misma horquilla de tamaño, es decir, para las capas I y II el tamaño que podrán alojar será  $D_{UAV} \leq 0,39m$ .

Se ha de recordar que, con el objetivo de aportar una mayor seguridad al sistema tal y como se mostró en el apartado 7.4, los sUAV de menor tamaño se encontrarán en las capas inferiores mientras que, por el contrario, los de mayor envergadura ocuparán la zona superior de la UAM.

Retomando la distribución de capas y considerando que en cada par de ellas se albergará el mismo tamaño de UAV, el factor que marcará la diferencia entre el par de capas de una misma horquilla de tamaño será la tecnología a bordo de cada aeronave.

Este término de “tecnología a bordo” puede ser muy amplio y poco conciso, por lo que, para poder acotarlo, la tecnología que realmente marcará la diferencia entre sUAS será la conocida como tecnología de “Sense-Avoid”. Esta permite a los UAV detectar en vuelo a otras aeronaves y su entorno para llevar a cabo maniobras de evasión automáticamente. Por lo que, cuanto más sofisticada sea esta tecnología basada en sensores, mayor será el autocontrol de la aeronave.

Por esta razón, dentro del par de capas de comparten tamaño de UAV, los que cuenten con tecnología “Sense-Avoid” serán los que se encuentre en la capa superior del par, ya que los niveles de seguridad que ofrecen estas aeronaves son bastante superiores al de los UAV sin sensores de detección de obstáculos.

Para el caso del par de capas que se encuentran en la parte de mayor altitud de la zona II, es decir, capa VII y capa VIII, debido a que serán las encargadas del transporte de las aeronaves de mayor envergadura, se permitirá que en ellas solo exista un único carril. Sin embargo, para resolver el doble sentido de la marcha, cada una de ellas tendrán un carril, pero con sentidos opuestos. Por tanto, en este único par no se tendrá en cuenta la tecnología a bordo de la aeronave.

A continuación, se presentará un cuadro resumen con la clasificación final de aeronaves por su tamaño y tecnología de acuerdo con el número de capa existentes en este ejemplo.

## DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS AÉREAS EN LA CIUDAD DE ALMERÍA PARA sUAS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS



Ilustración 93.- Distribución de sUAS en las ocho capas disponibles de la zona II de estudio, elaboración propia

### 11.4. Zonas conflictivas y mitigaciones

Tras haber analizado la situación actual de la ciudad de Almería y su espacio aéreo, relatado en el capítulo 5 de este informe, se puede resaltar una serie de zonas que se deberían de tener en consideración a la hora de la implementación de las estructuras aéreas y el tránsito de sUAS por ellas.

Estas zonas, debido a distintas razones y características, requerirán de la implementación de una serie de restricciones con el fin de evitar problemáticas de privacidad, disponibilidad, contaminación visual, etc.

A continuación, se mostrarán dichas zonas conflictivas y las mitigaciones necesarias en cada una de ellas:

Tabla 11.- Zonas conflictivas y las mitigaciones procedentes, elaboración propia

ZONAS CONFLICTIVAS	MITIGACIONES
<b>Zona portuaria</b>	Debido a la influencia radiomagnética que tienen las grandes estructuras metálicas, habrá que crear una zona de seguridad alrededor del puerto [46].
<b>Playas</b>	Con el fin de proteger la privacidad de las personas, estas zonas serán ZRVF, salvo si tiene una autorización explícita y una revisión posterior del material filmado.
<b>LED 36</b>	Por supuesto tendrá las mismas dimensiones y, para cruzarlo, habrá que consultar NOTAM activos.

ZONAS CONFLICTIVAS	MITIGACIONES
<b>Zona del conjunto monumental de la Alcazaba de Almería</b>	Alrededor de este conjunto con valor histórico se creará un pequeño espacio protegido con el fin de evitar la contaminación visual producida por la movilidad aérea urbana.
<b>Jardín botánico Parque El Boticario de Almería</b>	Para sobrevolar esta zona no habrá que pedir permiso a la autoridad competente. Simplemente se elevará la distancia de seguridad vertical respecto al resto de zonas de la ciudad.
<b>Aeropuerto de Almería y Helipuerto de Alhama de Almería</b>	Las áreas de seguridad y ATZ podrán disminuir sus radios de seguridad 1. Podrán volar UAS hasta 150m sin problema debido a las diferencias de FL. 2. Convivencia entre UAS, ATC y aviación tripulada, además de contar con un sistema UTM, en el que todos estos componentes serán conscientes de la situación real de cada uno en todo momento.
<b>Helipad de Torrecárdenas</b>	Esta zona poseerá: 1. Infraestructuras aéreas específicas dedicadas exclusivamente para las operaciones de UAS de salvamento, emergencia y rescate. 2. Este helipuerto tendrá una pequeña zona de seguridad para evitar el sobrevuelo del resto de UAS, que podrían ser futuros obstáculos en casos de emergencia.

Una vez tenidas en consideración dichas mitigaciones, se dará paso a la implementación final de las estructuras propuestas en este informe sobre la ciudad de Almería. Tras conocer las dimensiones de estas y su funcionamiento, se pasará a mostrar gráficamente el resultado final.

## Capítulo XII

### 12. RESULTADO FINAL DEL NUEVO ESPACIO AÉREO EN ALMERÍA

Los emplazamientos elegidos para mostrar este nuevo espacio aéreo son los mismos que los propuestos en el apartado 8.2, donde se trata la ubicación estratégica de los vertipuertos para una operativa eficiente en el transporte de mercancías en la ciudad de Almería, aportando conectividad a tres estructuras fundamentales para el servicio de transporte como son el aeropuerto, puerto marítimo y polígono industrial San Rafael.

A continuación, se evidencia la manera en que las ocho capas se ajustan a la geografía de las vías preexistentes, manteniendo una separación vertical de 9 metros entre sí; y cómo desembocan en las zonas troncocónicas de seguridad de los vertipuertos. En cuanto al desarrollo de las distancias horizontales de cada capa se muestra en el apartado 11.2.2. Finalmente, se podría obtener una idea general del resultado final de la implementación y funcionamiento de esta novedosa estructuración propuesta para la operación y desarrollo de la movilidad aérea urbana de sUAS en la ciudad de Almería.

Para ver en más detalle las siguientes ilustraciones, véase el ANEXO V.

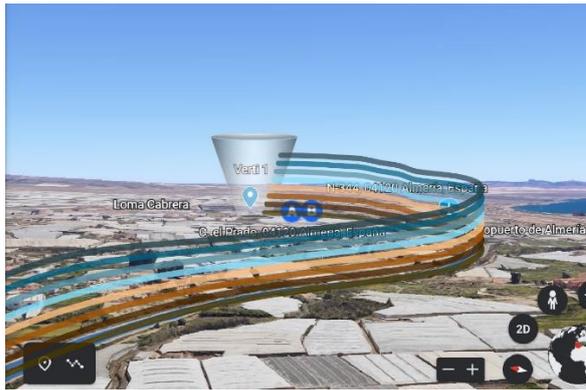


Ilustración 94.- Resultado final de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Aeropuerto de Almería, elaboración propia



Ilustración 95.- Nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Aeropuerto de Almería donde se observa la adaptación de la geografía aérea a la urbana ya existente, elaboración propia



Ilustración 96.- Resultado final de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Puerto marítimo de Almería, elaboración propia

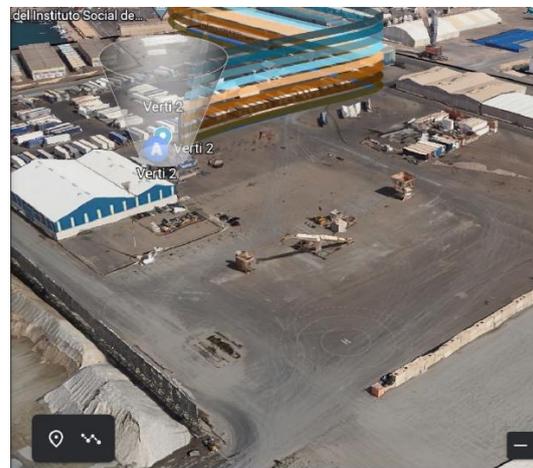


Ilustración 97.- Vista ampliada de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el actual Puerto marítimo de Almería, elaboración propia

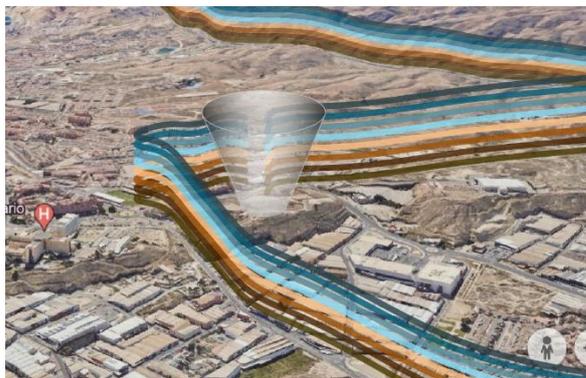


Ilustración 98.- Resultado final de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el polígono de San Rafael, elaboración propia



Ilustración 99.- Vista ampliada de las nuevas infraestructuras aéreas en el vertipuerto ubicado junto con el polígono de San Rafael, elaboración propia

### Capítulo XIII

## 13. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de este trabajo se ha intentado dar cabida a la movilidad aérea urbana de sUAS para el transporte de mercancías en la ciudad de Almería. Para ello ha sido necesario un estudio previo del estado de la legislación para este tipo de aeronaves y del emplazamiento elegido para instaurar un nuevo espacio aéreo.

Para la creación de este nuevo espacio aéreo ha sido necesario la división de este por zonas y el uso de diversas estructuras aéreas, desde una distribución por capas y carriles para el movimiento de sUAS hasta la creación de infraestructuras como los vertipuertos para sus salidas y llegadas.

Una vez conocido el lugar y la estructuración, se analizó en profundidad la perturbación de flujo generada por este tipo de aeronaves. Tras examinar varios estudios científicos y sacar unas conclusiones comunes entre ellos, se consiguió instaurar unas distancias de seguridad entre sUAS.

Por último, se dimensionó el espacio aéreo propuesto acorde con la geografía de la ciudad de Almería resultando finalmente que dicha ciudad tendría capacidad para albergar ocho capas y, por tanto, surgiendo siete categorías de sUAS clasificados de acuerdo con sus tamaños y tecnología a bordo.

### 13.1. Objetivos alcanzados

Tras evaluar las conclusiones sacadas de este trabajo, se ha cubierto satisfactoriamente el objetivo principal de este, es decir, se ha creado un espacio aéreo nuevo a este mercado emergente sin interrumpir el tráfico de la aviación general ya existente que se considera viable su implementación en el corto plazo en la ciudad de Almería o similares.

Retomando los objetivos propuestos al principio de este informe, se evaluará a continuación los objetivos conseguidos después de este estudio.

Tabla 12.- Metodología para conseguir los objetivos propuestos, elaboración propia

Objetivo propuesto	Método por el que se ha logrado
Estudiar la viabilidad de implementación de los UAS de transporte según la normativa actual.	Investigación documental y normativa del estado actual del espacio aéreo español y legislación vigente para el vuelo de UAS.
Diseñar la estructura básica del espacio aéreo para el movimiento de estos vehículos y que sea extrapolable en diferentes emplazamientos.	Establecimiento de la circulación de los sUAS a través de nuevas estructuras aéreas tales como capas y carriles con gran capacidad de adaptación a la geometría de las rutas terrestres ya existentes.
Crear un entorno de movilidad aérea urbana en el que puedan coexistir UAS de distintos tamaños y con distintas tecnologías a bordo.	Cálculo de unas distancias de seguridad tolerables y la distribución en distintas capas y niveles de vuelo para que las aeronaves de distinto tamaño y tecnología a bordo puedan coexistir sin un alto riesgo de colisión.
Compatibilidad entre la nueva movilidad urbana con la aviación existente	Zonificación del espacio aéreo por alturas sin superar los 150m para el transporte de mercancías, por lo que, salvo en zonas cercanas a aeródromos, no debería de existir conflicto. Además, se propone la necesidad de crear un sistema de gestión y control para esta nueva

Objetivo propuesto	Método por el que se ha logrado
	movilidad, UTC y UTM, los cuáles permanecerán en contacto permanente con ATC y ATM con el fin de coordinar posibles futuras incompatibilidades.
Creación de nuevas infraestructuras para la puesta en servicio de este tipo de aeronaves.	Proposición de vertipuertos como infraestructura para la salida y llegadas de estas aeronaves, así como la prestación de otros servicios tales como puntos de carga, hangares de reparación, terminales de pasajeros o almacenes para mercancías.
Establecer unas distancias de seguridad entre UAS que mantengan unos niveles de seguridad adecuados.	Estudio y evaluación científica y crítica de una serie de datos experimentales reales sobre la perturbación del flujo creada por un sUAS, llegando finalmente a una declaración de distancias de seguridad.
Elaboración de rutas para este tipo de aeronaves.	Adaptación de las estructuras aéreas de circulación de sUAS a la geografía existente de la ciudad de estudio y establecimiento de puntos de carga y descarga de mercancías (vertipuertos o vertipads).
Propuesta de mitigaciones ante posibles riesgos detectados.	Detección de posibles riesgos a través de un análisis de la situación actual de la ciudad de estudio y su espacio aéreo y propuesta de mitigaciones teniendo en consideración diversos factores como la privacidad, disponibilidad, contaminación visual, etc.

### 13.2. Trabajos futuros

Durante la elaboración de este proyecto se han ido proponiendo una serie de trabajos futuros que han ido surgiendo durante las distintas fases de este. A continuación, se hará una recopilación de ellos.

- *Estudiar en mayor profundidad la perturbación del flujo alrededor de los sUAS*

Para ello sería interesante realizar estudios de modelaje sobre distintos tipos de UAV, estudiar el vuelo en avance con distintos grados de inclinación e incluso cómo afectaría el viento procedente de diferentes direcciones.

- *Optimización de trayectorias*

Tal y como se ha propuesto en el apartado 8.3 se podría optimizar las trayectorias dado que las carreteras terrestres se encuentran más limitadas debido a la orografía, construcciones, etc. Sin embargo, en el aire estas barreras pueden ser menores ya que la UAM se desarrollará entre los 70 y 150m de altura en la ciudad de Almería. Para poder llevar a cabo esta optimización serán necesarios estudios específicos sobre la viabilidad de estas “nuevas rutas”.

- *Dar salida al transporte de pasajeros por medio de Aerotaxis/eVOLTs*

El desarrollo de este tipo de movilidad ha quedado fuera del alcance de este proyecto. No obstante, no se ha ignorado por completo estas aeronaves. Se han propuesto las estructuras aéreas de tubos de vuelo para su circulación en la Zona IV (que aplicado en Almería comprendería entre los 180 y 365 metros de altura) y se han incluido por medio de tubos afluentes a las infraestructuras de los vertipuertos donde se les dará servicio.

En este sistema de tubos el nivel de rigidez y control del tráfico se espera que sea menor que el impuesto en las capas dado que la tecnología a bordo de este tipo de UAS es bastante superior a los sUAS dedicados al transporte de mercancías.

No obstante, el estudio del funcionamiento y rendimiento de todas estas estructuras queda abierto para investigaciones, pruebas y trabajos futuros.

- *Optimización del diseño del nuevo espacio aéreo*

Debido a futuras problemáticas que puedan surgir en el desarrollo del tráfico aéreo urbano, se ha previsto que será necesario un sistema de control de este tráfico. El proyecto propuesto por la FAA para dar solución a esto es el llamado UTM (*Unmanned Aircraft System Traffic Management*). Se tratará de un sistema de gestión de tráfico cooperativo en torno a una base comunitaria, en la que se encuentran los operadores y entidades que ofrecerán el servicio de apoyo a las operaciones de los UAS.

La FAA y la NASA han desarrollado un Plan de Investigación UTM conjunto para documentar los objetivos de investigación y trazar el desarrollo de UTM. La FAA espera que las capacidades UTM se implementen gradualmente durante los próximos años [59].

Entre otros de los puntos a abordar para la mejora del sistema sería la tecnología a bordo de este tipo de aeronaves. Este desarrollo va de la mano con el proyecto de la FAA mencionado anteriormente, ya que con el desarrollo de ambas las operaciones se volverían mucho más automáticas, eficientes, seguras y rápidas. Para lograr este progreso se plantea una mayor investigación en las tecnologías "Sense-Avoid", geoconsciencia e, incluso, un desarrollo de las comunicaciones basadas en la red 5G.

En cuanto a la optimización de las estructuras aéreas, como se ha mencionado ya a lo largo de este informe, el sistema basado en capas de la zona II tendría un gran margen de mejora. Para ello sería necesario una reducción de las distancias de seguridad, suponiendo esto un aumento del número de capas y número de carriles a disposición para los operadores. Conllevando esto un aumento considerable de la capacidad, rendimiento y eficiencia energética del sistema.

Finalmente, se podría concluir que para conseguir todas estas mejoras manteniendo unos niveles de seguridad adecuados, será necesaria la investigación en un control del tráfico aéreo urbano, sistemas de gestión y comunicación adecuados, así como una maduración tecnológica lo cual conlleva tiempo y pruebas piloto.

## Capítulo XIV

### 14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Airestudio, G. T. (20 de septiembre de 2022). Airestudio Geoinformation Technologies. Obtenido de Airestudio Geoinformation Technologies: [https://www.airestudio.es/Faqs#:~:text=Un%20UAV%20\(o%20UAS\)%20es,System%E2%80%9D%20se%20refiere%20al%20sistema](https://www.airestudio.es/Faqs#:~:text=Un%20UAV%20(o%20UAS)%20es,System%E2%80%9D%20se%20refiere%20al%20sistema)
- [2] Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión. (09 de agosto de 2020). *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*. Recuperado el 21 de septiembre de 2022, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&qid=1666196621830&from=ES>
- [3] Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión. (4 de abril de 2022). *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. Recuperado el 22 de septiembre de 2022, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&qid=1666202446949&from=ES>
- [4] Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (s.f.). *Operaciones UAS/Drones - Categoría Abierta (Subcategorías A1, A2 Y A3)*. Recuperado el 30 de septiembre de 2022, de Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia Estatal de Seguridad.: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/operaciones-uas-drones/operaciones-con-uas-drones---categoria-abierta-subcategorias-a1-a2-y-a3>
- [5] Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (s.f.). *Operaciones UAS/Drones - Categoría Específica*. Recuperado el 1 de octubre de 2022, de Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia Estatal de Seguridad.: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/operaciones-uas-drones/operaciones-con-uas-drones---categoria-especifica>
- [6] Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (s.f.). *Resolución 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»*. Recuperado el 2 de octubre de 2022, de Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia Estatal de Seguridad.: [https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/0\\_20201202\\_\\_resolucion\\_escenarios\\_estandar\\_nacionales.pdf](https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/0_20201202__resolucion_escenarios_estandar_nacionales.pdf)
- [7] Agencia Estatal de Seguridad. (7 de octubre de 2021). *Presentación sobre requisitos fundamentales del escenario estándar nacional STS-ES-01 v1*. Recuperado el 3 de octubre de 2022, de Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia Estatal de Seguridad.: [https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/G-DUAS-OPR-DO02\\_v1\\_Requisitos.generales.STS-ES-01.pdf](https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/G-DUAS-OPR-DO02_v1_Requisitos.generales.STS-ES-01.pdf)
- [8] Agencia Estatal de Seguridad. (22 de noviembre de 2021). *Presentación sobre requisitos fundamentales del escenario estándar nacional STS-ES-02 v1*. Recuperado el 3 de octubre de 2022, de Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia Estatal de Seguridad.: [https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/G-DUAS-OPR-DO04\\_v1\\_Requisitos.generales.STS-ES-02.pdf](https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/G-DUAS-OPR-DO04_v1_Requisitos.generales.STS-ES-02.pdf)
- [9] EU Dron Port. (23 de mayo de 2022). *Categoría Específica Drones*. Recuperado el 2 de octubre de 2022, de <https://eudroneport.com/es/blog/categoria-especifica/>
- [10] Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (s.f.). *Operaciones UAS/drones - Categoría certificada*. Recuperado el 4 de octubre de 2022, de Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia Estatal de Seguridad.: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/operaciones-uas-drones/operaciones-con-uas-drones---categoria-certificada>
- [11] Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (13 julio 2023). *GUÍA SOBRE REQUISITOS Y LIMITACIONES AL VUELO DE UAS EN FUNCIÓN DEL LUGAR DE OPERACIÓN (ZONAS GEOGRÁFICAS DE UAS) (Versión 7, 13/07/2023)*. Recuperado el 6 de octubre de 2022, de Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia

- Estatal de Seguridad.: [eguridadaerea.gob.es/sites/default/files/UAS-OPS-DT01\\_v7\\_Zonas.geograficas.UAS\\_.pdf](https://seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/UAS-OPS-DT01_v7_Zonas.geograficas.UAS_.pdf)
- [12]Boletín Oficial del Estado. (29 de diciembre de 2017). *Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto [...]*. Recuperado el 6 de octubre de 2022, de Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales: <https://www.boe.es/boe/dias/2017/12/29/pdfs/BOE-A-2017-15721.pdf>
- [13]Boletín Oficial del Estado. (10 de noviembre de 2018). *Real Decreto 1180/2018, de 21 de septiembre, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea [...]*. Recuperado el 6 de octubre de 2022, de Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes e Igualdad: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2018/09/21/1180/dof/spa/pdf>
- [14]ENAIRE. (s.f.). *Aplicación Enaire Drones*. Obtenido de <https://drones.enaire.es/>
- [15]Japay, P. D. (2021). *Análisis de protocolos para la estandarización de la descripción de misiones UAS*.
- [16]AIP ESPAÑA. (s.f.). Obtenido de NOTAM: <https://aip.enaire.es/AIP/NOTAM-es.html>
- [17]Jaewoo Jung, S. N. (27 de septiembre de 2016). *Applying required navigation performance concept for traffic management of small unmanned aircraft systems*. Obtenido de NTRS - NASA Technical Reports Server: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160011496>
- [18]Ethan Pang, A. C. (24 de junio de 2018). *Investigation towards a better understanding of noise generation from UAV propellers*. Obtenido de AIAA 2018-3450: <https://doi.org/10.2514/6.2018-3450>
- [19]Stephen A. Rizzi, D. L. (2 de junio de 2017). *Annoyance to noise produced by a distributed electric propulsion high-lift system*. Obtenido de AIAA 2017-4050: <https://doi.org/10.2514/6.2017-4050>
- [20]Pavan Yedavalli, J. M. (2019). *An Assessment of Public Perception of Urban Air Mobility*. Obtenido de Airbus: <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlccta136/files/2022-07/Airbus-UTM-public-perception-study%20-urban-air-mobility.pdf>
- [21]Uber Elevate. (27 de octubre de 2016). *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation*. Obtenido de Evtol News: [https://evtol.news/\\_\\_media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf](https://evtol.news/__media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf)
- [22]Ronald A. Martin, A. H. (1 de enero de 2016). *Privacy aware mission planning and video masking for UAV systems*. . Recuperado el 22 de octubre de 2022, de AIAA Infotech @Aerosp: <https://doi.org/10.2514/6.2016-0250>
- [23]FAA NASA, US Department of Transportation. (2020). *Urban Air Mobility (UAM), Concept of Operations V1.0*. Obtenido de Office of NextGen: [https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM\\_ConOps\\_v1.0.pdf](https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf)
- [24]SESAR Joint Undertaking. (9 de enero de 2017). *U-Space Blueprint*. Obtenido de <https://www.sesarju.eu/u-space-blueprint>

- [25]Michael J. Logan, E. B. (5 de enero de 2020). *Operational Considerations of Small UAS in Urban Canyons*. Recuperado el 22 de octubre de 2022, de AIAA 2020-1483: <https://doi.org/10.2514/6.2020-1483>
- [26]Shibasaki, D. M. (26 de junio de 2019). *Low cost GNSS receiver system for high precision GNSS data processing*. Obtenido de Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo: [www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2019/UN\\_Fiji\\_2019/S2-10.pdf](http://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2019/UN_Fiji_2019/S2-10.pdf)
- [27]School of Electronics Engineering and Computer Science, P. U. (22 de julio de 2019). *RTK with the Assistance of an IMU-Based Pedestrian Navigation Algorithm for Smartphones*. Obtenido de Sensors 19: <https://doi.org/10.3390/s19143228>
- [28]RTCA. (mayo de 2002). *Minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast*. Obtenido de NTRS - NASA Technical Reports Server: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020060738>
- [29]Kevin Vicencio, T. K. (17 de diciembre de 2015). *Energy-optimal path planning for six-rotors on multi-target missions*. Obtenido de IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7353714>
- [30]Insignia Enaire. (29 de octubre de 2022). Obtenido de <https://insignia.enaire.es/>
- [31]Amazon. (julio de 2015). *Revising the Airspace Model for the Safe Integration of Small Unmanned Aircraft Systems*. Obtenido de [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/amazon\\_revising\\_the\\_airspace\\_model\\_for\\_the\\_safe\\_integration\\_of\\_suas6\\_0.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/amazon_revising_the_airspace_model_for_the_safe_integration_of_suas6_0.pdf)
- [32]Trabado, C. (s.f.). *Aerotaxis en el horizonte de la Movilidad Aérea Urbana (UAM)*. Obtenido de AERTEC Solutions: <https://aertecsolutions.com/2021/03/01/aerotaxis-en-el-horizonte-de-la-movilidad-aerea-urbana-uam/>
- [33]EASA European Union Aviation Safety Agency. (19 de mayo de 2021). *Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe*. Obtenido de <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/127760/en>
- [34]Dae-Sung Jang, C. A. (5 de enero de 2017). *Concepts of airspace structures and system Analysis for UAS traffic flows for urban areas*. Obtenido de AIAA 2017-0449: <https://doi.org/10.2514/6.2017-0449>
- [35]Akhtar, A. (16 de abril de 2020). *Different approaches to UAS Traffic flow control for mass scale Urban air transportation*. Obtenido de <https://wassafss.medium.com/different-approaches-to-uas-traffic-flow-control-for-mass-scale-urban-air-transportation-1533c39f4f06>
- [36] Wingcopter. (enero de 2021). *Technical Details Wingcopter 178 Heavy Lift A (Delivery Variant)*. Obtenido de <https://wingcopter.com/wp-content/uploads/2021/02/Technical-Details-Wingcopter-178-Heavy-Lift-A-Delivery-Variant-1-1.pdf>
- [37]Cajal., F. J. (agosto de 2018). *LOS CASCOS, SU UTILIDAD PARA LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES*. Obtenido de xdoc.mx: <https://xdoc.mx/documents/los-cascos-su-utilidad-para-la-prevencion-de-accidentes-5e976e290a055>

- [38]DroneVal. (s.f.). Obtenido de DroneVal: <https://droneval.com/accesorios/-3211paracaidas-drones-menos-de-2kg>
- [39]Hoekstra, J., Maas, J., Tra, M., & Sunil, E. (2016). *How do you layered airspace design parameters affect airspace capacity and safety?* Obtenido de In 7th International Conference on Research in Air Transportation:: [https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/87262684/ICRAT\\_2016\\_paper\\_6.pdf](https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/87262684/ICRAT_2016_paper_6.pdf)
- [40]Moreira, J. A. (s.f.). *AERTEC*. Obtenido de Aeropuertos verticales: la movilidad del futuro: <https://aertecsolutions.com/2021/06/28/aeropuertos-verticales-la-movilidad-del-futuro/>
- [41]Federal Aviation Administration. (21 de septiembre de 2022). *Vertiport Design, Engineering Brief No. 105*. Obtenido de FAA: <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-09/eb-105-vertiports.pdf>
- [42]Volocopter GmbH. (2021). *VTOL de transporte de pasajeros VC200*. Obtenido de Aero Expo: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/volocopter-gmbh/product-171323-11167.html>
- [43]OACI (Organización de Aviación Civil Internacional). (2015). *Anexo 14.- Volumen II Helipuertos*.
- [44]Volocopter. (2021). Obtenido de VOLOPORT Cleared for takeoff: <https://www.volocopter.com/en/solutions/volocport>
- [45]Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (s.f.). Obtenido de Políticas Aeroportuarias/Área y superficie de aproximación: <https://www.transportes.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/politicas-aeroportuarias/integracion-territorial-aeroportuaria/servidumbres-y-ruídos/area-y-superficie-de-aproximacion>
- [46]EUROCONTROL. (29 de noviembre de 2019). *Final Report of Riga CTR Airspace Assessment*. Riga
- [47]E Sunil, J. H. (2015). *Metropolis: Relating Airspace Structure and Capacity for Extreme Traffic Densities*. Obtenido de <https://enac.hal.science/hal-01168662/>
- [48]Plan Director del Aeropuerto de Almería. (Septiembre de 2020). Obtenido de Necesidades Futuras: [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/aviacion/planes\\_directores/almeria/memoria/cap4.lei.necesidades.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/aviacion/planes_directores/almeria/memoria/cap4.lei.necesidades.pdf)
- [49]Plan Director del Aeropuerto de Almería. (Septiembre de 2020). Obtenido de Máximo Desarrollo Posible: [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/aviacion/planes\\_directores/almeria/memoria/cap6.lei.maximo\\_desarrollo.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/aviacion/planes_directores/almeria/memoria/cap6.lei.maximo_desarrollo.pdf)
- [50]Wenwu Zhou, Z. N. (Junio de 2017). *An Experimental Investigation on Rotor-to-Rotor Interactions of Small UAV*. Obtenido de Department of Aerospace Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa: <https://www.researchgate.net/publication/318169570>
- [51]Zhe Ning, R. W. (Junio de 2017 ). *An Experimental Study on Small UAV Propellers with Serrated Trailing Edges*. Obtenido de Department of Aerospace Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa: <https://www.researchgate.net/publication/318144117>

- [52] Nathanael, J. C., Wang, J. C.-H., & Low, K. H. (2021). *Preliminary investigation of wake vortex generated by spinning quadrotor propellers using overset mesh*. Obtenido de Air Traffic Management Research Institute (ATMRI), Nanyang Technological University: <https://doi.org/10.2514/6.2021-1309>
- [53] Scott E. Thibault, D. H. (Enero de 2017). *CFD Simulation of a Quad-Rotor UAV with Rotors in Motion Explicitly Modeled*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/315756270>
- [54] Russell C., G. W. (Junio de 2016). *Wind Tunnel and Hover Performance Test Results for Multicopter UAS Vehicles*. Obtenido de Ames Research Center: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160007399>
- [55] Volt Drone. (s.f.). *DRONE VOLT HERCULES 20 HIGH PAYLOAD CAPACITY DRONE*. Recuperado el febrero de 2022, de [https://www.dronevolt.com/wp-content/uploads/2022/04/H20\\_\\_WEB\\_EN\\_dronevolt.pdf](https://www.dronevolt.com/wp-content/uploads/2022/04/H20__WEB_EN_dronevolt.pdf)
- [56] EMBENTION. (s.f.). *M600WP Multirotor Drone*. Obtenido de <https://www.embention.com/product/m600-multirotor-drone/>
- [57] Cordovilla, J. (2016). *Syma X8C: Prueba y análisis del nuevo dron de Syma*. Obtenido de <https://www.gizlogic.com/syma-x8c-venture-analisis-opinion/>
- [58] Fly Dragon X-Drone. (febrero de 2022). *Quadcopter drone 90 minutes endurance*. Obtenido de <http://www.dronefromchina.com/product/FDG-815-small-quadcopter-drone-90-minutes-endurance.html>
- [59] FAA.-Federal Aviation Administration. (16 de Agosto de 2022). *Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM)*. Obtenido de [https://www.faa.gov/uas/research\\_development/traffic\\_management](https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_management)
- [60] Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (s.f.). *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Agencia Estatal de Seguridad*. Recuperado el 21 de septiembre de 2022, de <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/espacio-aereo/descripcion>
- [61] Reglamento de Ejecución (UE) n ° 923/2012 de la Comisión. (27 de enero de 2022). *Reglamento de Ejecución (UE) n ° 923/2012 de la Comisión, de 26 de septiembre de 2012, por el que se establecen el reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea*. Recuperado el 22 de septiembre de 2022, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0923&qid=1666201816310&from=ES>
- [62] ToB. (15 de enero de 2013). *Take Off Briefing*. Recuperado el 22 de septiembre de 2022, de <http://takeoffbriefing.com/como-se-divide-y-organiza-el-espacio-aereo-firctrmtaatzcta-video/>
- [63] Multicopterox. (15 de abril de 2018). *División del espacio aéreo: ¿Dónde se puede volar un multicoptero?* Recuperado el 23 de septiembre de 2022, de <http://www.multicopterox.es/division-del-espacio-aereo-donde-se-puede-volar-un-multicoptero/>

[64]Hispadrones. (24 de septiembre de 2019). *Clases de espacio aéreo*. Recuperado el 23 de septiembre de 2022, de <https://www.hispadrones.com/principiantes/aprendizaje-consejos/clases-de-espacio-aereo/>

## ANEXO I. GLOSARIO

VANT	Vehículo Aéreo no Tripulado
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aerial System
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
EASA	Agencia Europea de Seguridad Aérea
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
MTOW	Maximum Take Off Weight
FIR	Flight Information Region
UIR	Upper Information Region
FL	Flight Level
CTA	Áreas de control
CTR	Zonas de control
TMA	Áreas de control terminal
ATZ	Zona de tránsito de aeródromo
LEP	Zonas prohibidas
LER	Zonas restringidas
LED	Zonas peligrosas
F	Zonas con fauna sensible
AWY	Aerovía
CAO	Circulación Aérea Operativa
RCAO	Reglamento de Circulación Aérea Operativa
VFR	Visual Flight Rules
IFR	Instrumental Flight Rules
ATS	Air Traffic Service
AMSL	Above Mean Sea Level
RMZ	Radio Mandatory Zone
IAS	Indicated Airspeed
NOTAM	Notice to Airmen
VLOS	Visual Line Of Sight
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
LUC	Certificado de operador de UAS ligeros
SAIL	Specific Assurance Integrity Level
OSOs	Objetivos de seguridad operacional
PDRA	Predefined Risk Assessment
FIZ	Flight Information Zone
ATSP	Air Traffic Service Provider
AMC	Medios Aceptables de Cumplimiento
ARP	Punto de referencia del aeródromo
EARO	Evaluación y Atenuación del Riesgo Operacional
CONOPs	Conceptos de operación
ZRVF	Zonas restringidas al vuelo fotográfico
ZEPA	Zona de especial protección para aves
LEI	Aeropuerto de Almería
LEAM	Zona de seguridad del Aeropuerto de Almería

LELM	Zona de seguridad del Helipuerto de Alhama de Almería
TSA	Temporary Segregated Area
TRA	Temporary Reserved Area
ATC	Air Traffic Control
AFIS	Aerodrome Flight Information Service
UTM	Unmanned Aircraft System Traffic Management
UTC	Unmanned Aircraft System Traffic Control
PAV	Personal Air Vehicle
PIV	Velocimetría de imagen de partículas

## ANEXO II. LISTA DE SÍMBOLOS

$h_{seg_{obs}}$	Altura de seguridad respecto al obstáculo de mayor altura
$h_{zonaII}$	Altura correspondiente a la Zona II
$h_{obs_{mayor}}$	Altura del obstáculo de mayor altura de la ciudad de estudio
$D_{hélice}$	Distancia del diámetro de la hélice
$R_{hélice}$	Distancia del radio de la hélice
$L$	Distancia entre rotores
$b_{f1}$	Distancia horizontal entre el cuerpo del UAV y el rotor inclinado
$d_{avh}$	Distancia de avance desde la hélice
$d_{avb}$	Distancia de avance desde el cuerpo del UAV
$d_{avb+seg}$	Distancia de avance desde el cuerpo del UAV + coeficiente de seguridad
$d_{h_{2^o}b}$	Distancia horizontal del segundo vehículo entre su propio cuerpo y su respectivo rotor de ataque
$d_{avb-b}$	Distancia horizontal entre cuerpos de sUAVs
$d_{vh}$	Distancia vertical desde la hélice (inferior)
$d_{lms}$	Distancia lateral entre carriles del mismo sentido
$d_{lds}$	Distancia lateral entre carriles de distinto sentido
$b_{h_1}$	Distancia horizontal desde cuerpo hasta el rotor inclinado
$b_{h_2}$	Distancia horizontal que puede alcanzar el flujo perturbado desde la hélice
$h_{h_1}$	Distancia vertical que puede alcanzar el flujo perturbado desde la hélice
$d_{hbf}$	Distancia horizontal total desde el cuerpo de la aeronave y hasta el punto donde el flujo turbulento se puede considerar como despreciable
$d_{vpf}$	Distancia vertical que puede alcanzar el flujo perturbado desde la hélice (= $h_{h_1}$ )
$A_c$	Ancho de capa = Ancho de calle
$h_c$	Altura de capa
$h$	Doble altura entre capas
$d_v$	Distancia vertical entre capas
$d_{limcapa}$	Distancia de seguridad entre carriles y los límites de capa

## ANEXO III. DEFINICIONES DEL ESPACIO AÉREO ACTUAL

### A. Regiones de información de vuelo

Según AESA [60], la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) divide el espacio aéreo<sup>5</sup> mundial en nueve regiones de información de vuelo o FIR (Flight Information Region). Además, cada región de información se divide verticalmente en dos. Por un lado, la región inferior o FIR y por otro lado la región superior o UIR (Upper Information Region).

- El FIR se extiende desde el suelo hasta el nivel de vuelo FL245
- El UIR va desde el FL245 hasta el infinito

El espacio español se encuentra dentro de la FIR europea (FIR EU) y, a su vez, se divide en tres regiones más pequeñas: FIR Madrid, FIR Barcelona y FIR Canarias como se muestra en la siguiente ilustración, además en ella se puede apreciar la existencia de una delegación del FIR de Madrid en Sevilla la cual se hace cargo de la parte sur.

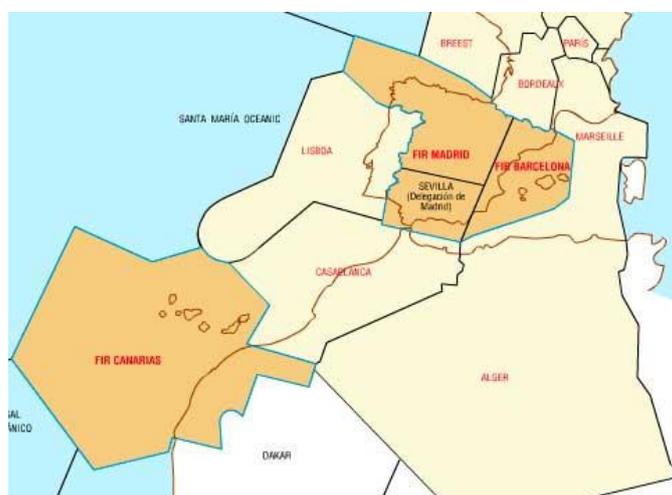


Ilustración 100.- Distribución FIR en España, fuente [62]

#### A3.1. Región inferior FIR

Esta región inferior FIR está compuesta por distintas áreas

- **Áreas de control (CTA):** Volumen de espacio aéreo controlado que sirve para proteger a las aeronaves desde que despegan hasta que entran en ruta. Se extienden desde una altura determinada hacia arriba, nunca desde el suelo. En España tiene que empezar a una altura por encima de 300m, para que por debajo de esa altura puedan operar las aeronaves con VFR.
- **Zonas de control (CTR):** Espacio asociado a un aeródromo que tiene como misión proteger las entradas y salidas IFR. Una misma CTR puede incluir varios aeródromos

<sup>5</sup> Según la Agencia Estatal de Seguridad (AESA) [60] el espacio aéreo se trataría de: “una porción de la atmósfera terrestre sobre tierra o agua, que está regulada por un país en particular. De acuerdo con el tipo de operaciones que alberga, se puede hablar de diferentes clases de espacios aéreos”.

próximos. Esta zona suele cubrir un radio de 5NM a partir del centro del aeropuerto y un espacio vertical parte desde el terreno hasta el nivel inferior de CTA.

- **Áreas de control terminal (TMA):** Se tratan de áreas donde confluyen aerovías con rutas de aproximación y salida sobre uno o varios aeropuertos. Su principal objetivo es controlar el tráfico IFR que entra y sale de los mismos.
- **Zonas de tránsito de aeródromo (ATZ):** Esta área está destinada al movimiento de aeronaves en las proximidades de un aeródromo. Es un espacio controlado diseñado para que la torre de control pueda controlar el tránsito y proteger a los vuelos VFR. Tiene unas dimensiones máximas de un cilindro de 8km de radio y 900 metros de altura. Esta zona suele estar englobada dentro de un CTR debido a la coexistencia entre IFR y VFR.
- **Zonas prohibidas (P):** En las cartas aeronáuticas estas zonas se señalan como LEP. Es necesario el permiso previo del ministerio de Defensa.
- **Zonas restringidas (R):** Se identifica como LER y solo se pueden sobrevolar por aeronaves del estado en caso de emergencia.
- **Zonas peligrosas (D):** Estas zonas aparecen como LED. Algunas aeronaves las pueden sobrevolar siempre que se asegure que no se están realizando ninguna actividad peligrosa.
- **Zonas con fauna sensible (F):** Se identifican en las cartas como F, y trata a áreas protegidas como parques naturales los cuales no llegan a la categoría de parque nacional. En algunas ocasiones su sobrevuelo podría ser posible con los permisos de la autoridad autonómica responsable.
- **Espacio aéreo no controlado**



Ilustración 101.- Áreas por las que se compone FIR, fuente [63]

### A3.2. Región superior UIR

Entre las zonas que puede albergar esta región se encuentran algunas estructuras como el TMA de Canarias (límite vertical FL460), o algunas zonas P, D o R.

## B. Clasificación y Estructura del Espacio Aéreo en España

De acuerdo con lo conforme en la Sección 6 del Reglamento (UE) 923/2012 [61], por el que se establecen el reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea, el espacio aéreo se puede dividir en controlado y no controlado.

### B3.1. Espacio Aéreo Controlado

El espacio aéreo controlado está comprendido por:

- Espacio aéreo de las FIR/UIR de Madrid, Barcelona y Canarias entre FL150 Y FL460 excepto zonas peligrosas, prohibidas y restringidas.
  - Aerovías (AWY)
  - Áreas de control (CTA), zonas de control (CTR) y Áreas de Control Terminal (TMA) recogidas dentro del AIP-ESPAÑA.
  - Estructuras del espacio aéreo asociadas a la gestión del uso flexible
    - Espacio aéreo de coordinación previa (PCA)
    - Espacio aéreo de coordinación reducida (RCA)
    - Espacio aéreo temporalmente reservado (TRA)
    - Espacio aéreo temporalmente segregado (TSA)
- encontrándose todas estas áreas mencionadas en espacios controlados, además de rutas condicionales (CDR), zonas transfronterizas (CBA), zonas promulgadas en espacio aéreo controlado.

Dentro de este espacio aéreo controlado dependiendo del tipo de vuelo y los servicios de tránsito aéreo se clasifican en A, B, C, D y E.

### B3.2. Espacio Aéreo No Controlado

El espacio aéreo no controlado alberga el resto de espacio no mencionado en el apartado anterior. En este espacio se suministrará servicio de asesoramiento anticollisión a la CAO (Circulación Aérea Operativa), de acuerdo con las normas RCAO (Reglamento de la Circulación Aérea Operativa), en la medida en la que los medios técnicos lo permitan. De nuevo, dependiendo del tipo de vuelo y los servicios de tránsito aéreo facilitados, se clasifican en F y G.

Una vez se conocen la clasificación de espacios aéreos (A, B, C, D, E controlados y F, G no controlados) en el caso de que dichos espacios se solapen, en parte o en su total, los vuelos en dicho espacio se registrarán por las normas del espacio más restrictivo, siendo por ejemplo el espacio B menos restrictivo que el A, excepto en sectores y pasillos VFR (Visual Flight Rules).



Ilustración 102.- Clasificación del espacio aéreo, fuente [63]

De acuerdo con el Reglamento de Ejecución (UE) nº 923/2012 de la Comisión del 26 de septiembre de 2012, en el apéndice 4 se encuentra la *clasificación de los espacios aéreos ATS – Servicios suministrados y requisitos de vuelo* a partir de SERA (*Standardised European Rules of the Air*) 6001 y SERA 5025 b) [61]. En la tabla siguiente se muestran las características de los distintos espacios aéreos definidos en la normativa europea:

## ANEXO III. DEFINICIONES DEL ESPACIO AÉREO ACTUAL

Tabla 13.- Clasificación de los espacios aéreos ATS y servicios y requisitos suministrados, fuente [61]

Clase	Tipo de vuelo	Separación suministrada	Servicio suministrado	Limitación de velocidad	Capacidad para la comunicación por radio obligatoria	Se requiere comunicación aeroterrestre bidireccional por voz	Sujeto a una autorización ATC
<b>A</b>	Solo IFR	Todas las aeronaves	Servicio de control de tránsito aéreo	No aplicable	Sí	Sí	Sí
<b>B</b>	IFR	Todas las aeronaves	Servicio de control de tránsito aéreo	No aplicable	Sí	Sí	Sí
	VFR	Todas las aeronaves	Servicio de control de tránsito aéreo	No aplicable	Sí	Sí	Sí
<b>C</b>	IFR	IFR de IFR IFR de VFR	Servicio de control de tránsito aéreo	No aplicable	Sí	Sí	Sí
	VFR	VFR de IFR	1) Servicio de control de tránsito aéreo para separación de IFR 2) Servicio de control de tránsito aéreo, información de tránsito VFR/VFR (y asesoramiento anticollisión, si se solicita)	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	Sí	Sí	Sí
<b>D</b>	IFR	IFR de IFR	Servicio de control de tránsito aéreo, información de tránsito acerca de vuelos VFR (y asesoramiento anticollisión, si se solicita)	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	Sí	Sí	Sí
	VFR	Ninguna	Servicio de control de tránsito aéreo, información de tránsito IFR/VFR y VFR/VFR (y asesoramiento anticollisión, si se solicita)	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	Sí	Sí	Sí
<b>E</b>	IFR	IFR de IFR	Servicio de control de tránsito aéreo y, en la medida de lo posible, información de tránsito acerca de vuelos VFR	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	Sí	Sí	Sí
	VFR	Ninguna	Información de tránsito, en la medida de lo posible	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	No (**)	No (**)	No
<b>F</b>	IFR	IFR de IFR en la medida de lo posible	Servicio de asesoramiento de tránsito aéreo; servicio de información de vuelo, si se solicita	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	Sí (***)	No (***)	No
	VFR	Ninguna	Servicio de información de vuelo, si se solicita	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	No (**)	No (**)	No
<b>G</b>	IFR	Ninguna	Servicio de información de vuelo, si se solicita	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	Sí (**)	No (**)	No
	VFR	Ninguna	Servicio de información de vuelo, si se solicita	250 nudos IAS por debajo de los 3 050 m (10 000 ft) AMSL	No (**)	No (**)	No

(\*) Cuando el nivel de la altitud de transición es inferior a los 3 050 m (10 000 ft) AMSL, debe usarse el nivel de vuelo 100 en lugar de 10 000 ft.

(\*\*) Los pilotos se mantendrán a la escucha de la comunicación aeroterrestre continua por voz y establecerán una comunicación en ambos sentidos, según sea necesario, por el canal de comunicaciones apropiado en RMZ.

(\*\*\*) Comunicación aeroterrestre por voz obligatoria para vuelos que participen en el servicio de asesoramiento. Los pilotos se mantendrán a la escucha de la comunicación aeroterrestre continua por voz y establecerán una comunicación en ambos sentidos, según sea necesario, por el canal de comunicaciones apropiado en RMZ.

## ANEXO IV. ZONIFICACIÓN

Tabla 14.- Zonificación del espacio aéreo nacional de acuerdo con AESA [11], elaboración propia

	Actividades recreativas	Actividades profesionales
<b>Operaciones sobre aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados</b>	Únicamente si MTOW < 250 gr y una altura < 20m siempre en VLOS.	Sólo si MTOW < 10 kg, VLOS, distancia horizontal máxima es de 100m con respecto al piloto y altura máxima de 120m. ✓ <b>Categoría abierta</b> UAS debe atener un dispositivo de la limitación de energía de impacto, y haber elaborado un estudio de seguridad previo. Comunicación previa con el Ministerio de Interior y acote la zona o se mantenga la distancia mínima de 50 m con respecto a edificios y personas. ✓ <b>STS-ES-01- declaración operacional</b> ✓ <b>Cat. Específica- Autorización operacional</b>
<b>Operaciones sobre personas al aire libre</b>	No se establecen limitaciones sobre este tipo de actividades	✓ <b>Categoría abierta</b> No está permitido ✓ <b>Cat. Específica y/o Certificada</b> Requiere de una autorización previa de AESA
<b>Operación próxima a aeropuertos, aeródromos y helipuertos</b>	-Una distancia mínima de 8km con respecto al ARP y la misma distancia respecto de los ejes de las pistas y su prolongación, en ambas cabeceras, hasta una distancia de 6 km contados a partir del umbral en sentido de alejamiento de la pista. -Esta distancia podría reducirse cuando así se haya acordado con el gestor aeroportuario y con el ATSP.	-La regla se aplica igual que para la actividad recreativa, pero para el caso de un BVLOS y la infraestructura cuente con IFR, la distancia mínima en este caso será de 15km del ARP. -Esta distancia podría reducirse siempre con una previa coordinación con el gestor aeroportuario y ATSP. Esta coordinación debe de estar documentada y estar a disposición de AESA.

	Actividades recreativas	Actividades profesionales
<b>Operación próxima a aeródromos militares</b>	En este caso el gestor del aeródromo y ATSP son el mando de la base aérea. Por lo que la coordinación se ha realizar con dicho mando.	Se operará de la misma manera que las actividades recreativas.
<b>Operación en espacio aéreo controlado o FIZ</b>	Sólo podrán realizarse en el caso de que el operador del UAS se haya coordinado previamente con el ATSP.	<p>✓ <b>Requisitos de equipos y formación</b></p> <p>Equipo de comunicaciones bidireccionales con las estaciones aeronáuticas y en las frecuencias indicadas. El piloto deberá tener la calificación de radiofonista y conocimiento del idioma a utilizar.</p> <p>✓ <b>Estudio aeronáutico de seguridad y coordinación con el ATSP</b></p> <p>Se requiere de una EARO coordinado con el ATSP. AESA y los ATSP trabajan para desarrollar modelos tipo de EARO para distintos CONOPS de la categoría abierta y escenarios estándar nacionales.</p> <p>✓ <b>Plan de vuelo ATS (mensaje FPL) y autorización ATC o comunicación al personal AFIS</b></p> <p>En el plan de vuelo FPL se deberá indicar que se trata de un vuelo no tripulado.</p>
<b>Operaciones en zonas prohibidas (P), restringidas (R), peligrosas (D) y zonas con fauna sensible (F)</b>	No podrán realizarse en estas zonas a excepción de que la autoridad responsable de dicha zona haya habilitado lugares para ello y estén correctamente reflejados en el AIP y aplicación de ENAIRE Drones.	<p>Para volar estas zonas deberá ajustarse a las condiciones y limitaciones descritas en el AIP para cada área.</p> <p>✓ <b>Zonas militares (ya sean P, R o D)</b></p> <p>Deberá contar con la autorización previa del Ministerio de Defensa. El procedimiento está publicado en AIC NTL 01/22.</p> <p>✓ <b>Zonas prohibidas y segregadas y reservadas temporalmente (TSA y TRA)</b></p> <p>Mediante NOTAM se pueden modificar los horarios y/o límites de las zonas peligrosas, así como establecer los espacios TSA y TRA.</p>

	Actividades recreativas	Actividades profesionales
		<p>✓ <b>Zonas medioambientes y espacio protegidos</b></p> <p>Se necesitará una autorización previa por parte del gestor del espacio protegido, cumpliendo las restricciones establecidas en la legislación específica.</p>
<b>Operación en zonas restringidas al vuelo fotográfico (ZRVF)</b>	<p><b>Sin importar la finalidad</b>, todas las operaciones que suponga la toma de imágenes en ZRVF, está sujeta a las <b>provisiones y cautelas que determine el Ministerio de Defensa</b>, para lo cual deberán realizar la solicitud previa según el procedimiento establecido en la AIC NTL 05/20.</p>	
<b>Operaciones en instalaciones afectas a la defensa nacional y centrales nucleares</b>	<p>No podrán sobrevolar instalaciones afectas a la defensa nacional o la seguridad del estado y de centrales nucleares, incluida su zona de seguridad.</p>	<p>Sólo podrá realizarse con el permiso previo y expreso del responsable de la infraestructura.</p>
<b>Operaciones en instalaciones e infraestructuras críticas</b>	<p><b>No podrán volar instalaciones e infraestructuras críticas.</b> Salvo si son instalaciones de la industria química, transporte, energía, agua, etc.</p> <p>Entonces deberá realizarse a una <b>altura mínima de 50m</b> y un <b>mínimo de distancia horizontal de 25m</b> respecto su eje y a no menos de <b>10m respecto de su perímetro exterior</b> para el resto de los casos.</p>	<p><b>Sólo podrá realizarse con el permiso previo y expreso del responsable de la infraestructura.</b></p> <p>Además, para el vuelo sobre las instalaciones de la industria química, transporte, energía, agua, etc. Se seguirán las mismas distancias y alturas de seguridad que para el caso de las actividades recreativas.</p>

## ANEXO V. ESTRUCTURA FINAL DEL NUEVO ESPACIO AÉREO

A continuación, se muestran los detalles de las figuras mostradas en el capítulo 12 con la estructura final del espacio aéreo.

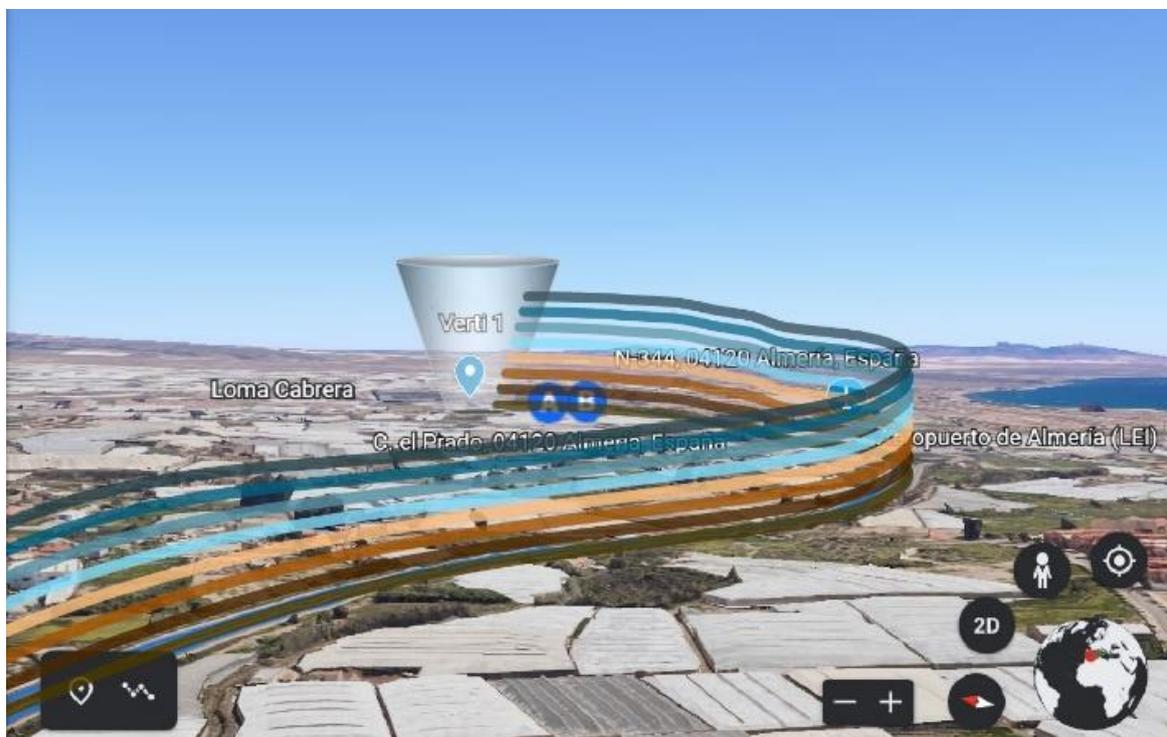


Ilustración 103.- Ampliación en detalle de la Ilustración 94



Ilustración 104.- Ampliación en detalle Ilustración 95



Ilustración 105.- Ampliación en detalle Ilustración 96

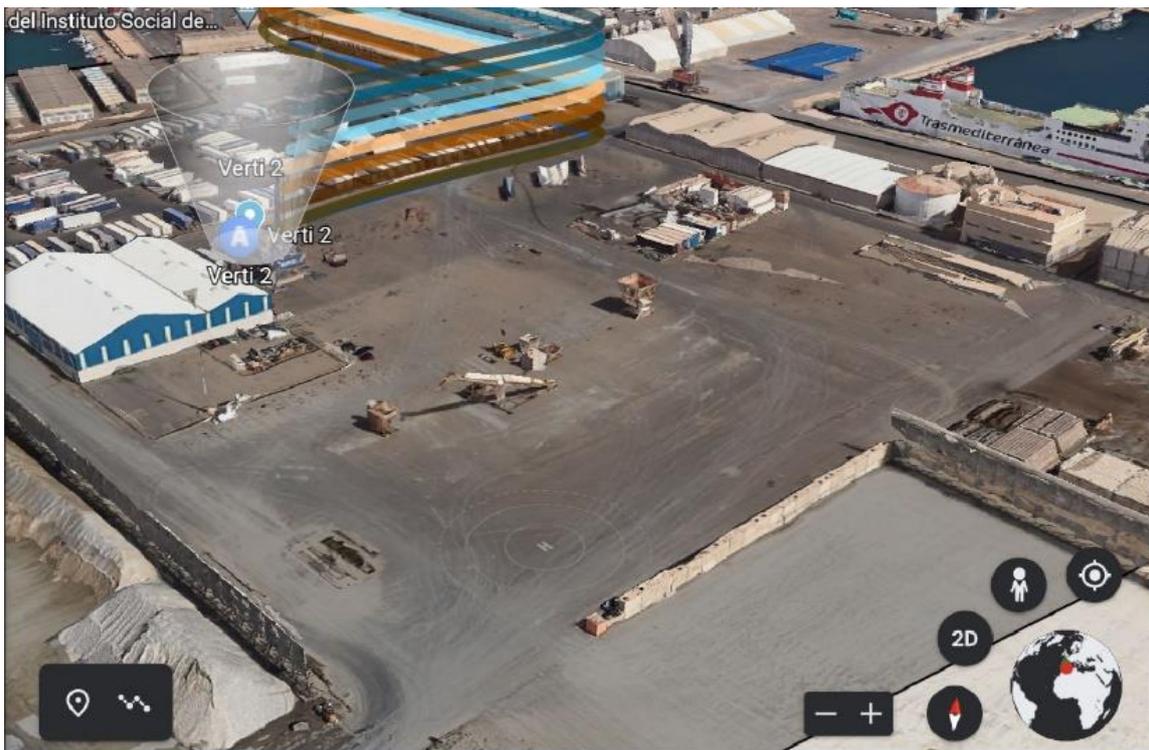


Ilustración 106.- Ampliación en detalle Ilustración 97



Ilustración 107.- Ampliación en detalle Ilustración 98

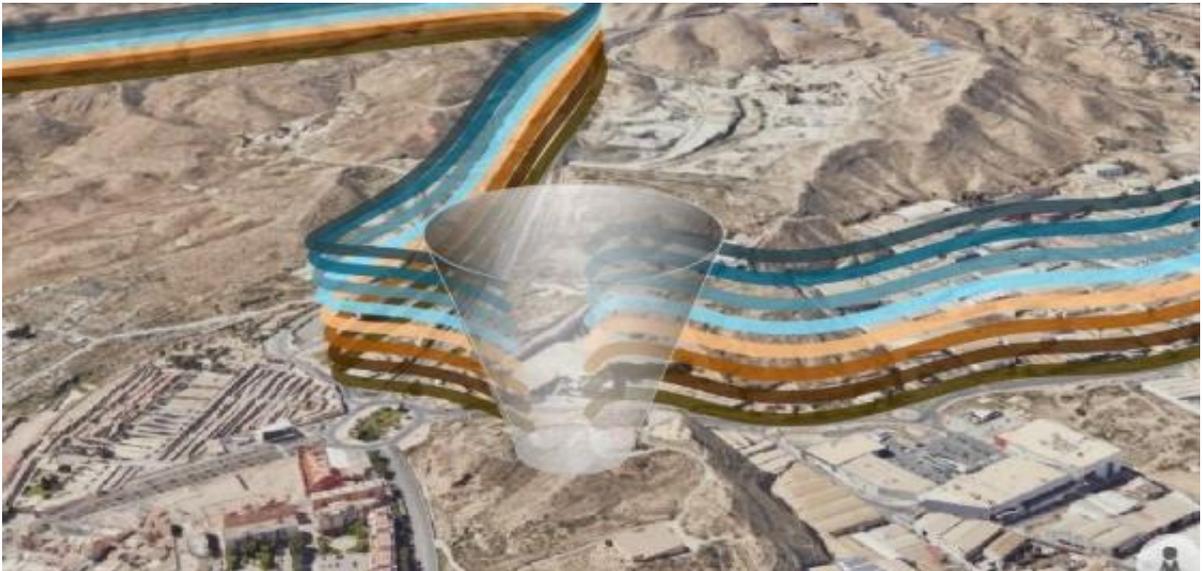


Ilustración 108.- Ampliación en detalle Ilustración 99