

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Aeroespacial

### Estudio de infraestructuras para aeronaves eVTOL. Aplicación al caso de taxi aéreo en Madrid

Autor: Álvaro Pérez-Carrasco Gómez

Tutor: Javier Niño Orti

Dpto. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de  
Ingeniería  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Estudio de infraestructuras para aeronaves eVTOL. Aplicación al caso de taxi aéreo en Madrid**

Autor:

Álvaro Pérez-Carrasco Gómez

Tutor:

Javier Niño Orti

Profesor Asociado

Dpto. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado: Estudio de infraestructuras para aeronaves eVTOL. Aplicación al caso de taxi aéreo en Madrid

Autor: Álvaro Pérez-Carrasco Gómez  
Tutor: Javier Niño Orti

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

A mis padres, por darme todo lo que tengo y ser mi apoyo incondicional, no dejando nunca que bajase los brazos.

A mi familia, por confiar siempre en mí, incluso cuando yo mismo no lo hacía.

A las personas que he conocido estos cinco años y que me llevaré para siempre, por animarme en los momentos difíciles y compartir conmigo los momentos de alegría.

Nada de esto hubiese sido posible sin vosotros. Lo hemos conseguido.

*Álvaro Pérez-Carrasco Gómez  
Sevilla, 2021*





# Resumen

---

En el mundo actual, fruto del crecimiento de las ciudades y la necesidad de movimiento en las mismas, problemas asociados a la congestión en las vías de acceso terrestres y la contaminación atmosférica están alcanzando valores muy preocupantes. La Movilidad Aérea Urbana, un nuevo concepto de transporte que permite emplear la tercera dimensión para el transporte urbano mediante aeronaves completamente eléctricas, se convierte en una idea revolucionaria y de futuro para liderar este cambio.

En particular, las aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) reúnen todas las características para operar en zonas urbanas de manera flexible, sostenible y cada vez más inteligente. Sin embargo, pese a que los avances tecnológicos en estas aeronaves son cada vez mayores, a menudo se tiende a olvidar uno de los mayores obstáculos para que esta idea pueda llevarse a cabo: la infraestructura terrestre que dé soporte a la operación de estos vehículos. De esta manera, el presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el análisis y estudio de la infraestructura necesaria para dar soporte a las operaciones con aeronaves eVTOL.

El trabajo está estructurado en una primera parte fundamentalmente teórica, donde se analizarán los retos que presenta este nuevo concepto de movilidad y el enfoque que se debe dar a la infraestructura terrestre necesaria, conocida como vertipuertos. Para ello, será necesario el estudio de las características de estas aeronaves, la tendencia de los fabricantes y las limitaciones que imponen en el corto plazo para el desarrollo de la Movilidad Aérea Urbana. A su vez, se contextualizará la ubicación de los vertipuertos en el mapa urbano, distinguiendo entre los distintos elementos que deben contener y realizando un análisis regulatorio de lo que será la normativa actualmente en desarrollo y la extrapolación y adaptación de la legislación actual a este nuevo tipo de aeronaves.

Posteriormente, en una segunda fase del trabajo, se expondrán las aplicaciones más destacadas que este medio de transporte ofrece, estudiando con detalle aquellas que mejor adaptación tendrían en entornos urbanos. Para estas aplicaciones, se analizarán los requisitos que la infraestructura terrestre debería cumplir y el proceso de desarrollo esperado en cada una de ellas.

Por último, y dentro de un ámbito académico, se pondrán en práctica los conocimientos adquiridos tras este proceso investigativo a través del diseño preliminar de una estación de aerotaxis en la ciudad de Madrid, para lo que será necesario establecer un planteamiento inicial acerca del desarrollo de este servicio en la ciudad durante una primera fase de crecimiento de la Movilidad Aérea Urbana, las ventajas que ofrece a la población y cuáles serían los mayores retos desde un punto de vista constructivo.



# Abstract

---

In the world of today, the growth of cities and the need to move through them develop problems associated with congestion on land access roads and air pollution. Urban Air Mobility, a new transport concept that allows the use of the third dimension for urban transportation by means of fully electric aircrafts, becomes a revolutionary and forward-looking idea to lead this change.

In particular, electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircrafts combine all the characteristics to operate in urban areas in a flexible, sustainable and increasingly intelligent way. However, despite the increasing technological advances in these aircraft, we often forget one of the biggest barriers: the ground infrastructure to support the operation of these vehicles. Thus, this project is focused on the analysis and study of the necessary infrastructure to support operations with eVTOL aircraft.

The thesis is structured in a mainly theoretical first part where the challenges presented by this new concept of mobility and our approach on ground infrastructure, known as vertiports, will be analysed. For this, it will be necessary to study the characteristics of these aircraft, the trend of manufacturers and the limitations which they impose in the short term for the development of Urban Air Mobility. At the same time, the location of vertiports in the urban environment and their infrastructure requirements will be studied based on the current regulations.

Subsequently, in a second phase of the work, the most outstanding applications that this means of transport offers will be presented, studying in detail those that would be best adapted to urban environments. For these applications, the requirements that the ground infrastructure should meet and the expected development process for each of them will be analysed.

Finally, from an academic point of view, the knowledge acquired after this research process will be put into practice through the preliminary design of an air taxi station in the city of Madrid, which includes an initial approach on its development during a first phase of growth of Urban Air Mobility, the advantages and a constructive analysis of the biggest challenges.



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice de Tablas</i>	IX
<i>Índice de Figuras</i>	XI
<i>Notación</i>	XIII
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos del proyecto	2
1.2 Estructuración del proyecto	2
<b>2 Movilidad Aérea Urbana</b>	<b>5</b>
2.1 Problemática actual en ciudades	5
2.2 Retos de la Movilidad Aérea Urbana	8
<b>3 Aeronaves eVTOL</b>	<b>11</b>
3.1 Tipología de aeronaves VTOL	14
3.2 Sistemas de almacenamiento	15
3.3 Otros requisitos	18
3.4 Fabricantes	20
3.4.1 EHang 216	20
3.4.2 Volocopter VoloCity	21
3.4.3 Airbus CityAirbus	21
3.4.4 Wisk (Kitty Hawk) Cora	22
3.4.5 Lilium Jet	23
3.4.6 Joby S4	24
<b>4 Infraestructura</b>	<b>25</b>
4.1 Contenido	26
4.1.1 Zona de despegue	26
4.1.2 Área de rodaje	27
4.1.3 Zona de estacionamiento	27
4.1.4 Instalación de recarga	27
4.1.5 Terminal	29
4.2 Contextualización en el entorno urbano	29
4.3 Normativa aplicable	30
4.4 Proyectos en desarrollo	31
4.4.1 VoloPort (Volocopter/Skyports)	32
4.4.2 E-Port (EHang)	33
4.4.3 Urban Air Port Air-One (Urban Air Port/Hyundai Motor Group)	33
4.4.4 Ferrovial	34

<b>5 Mercados de la UAM</b>	<b>37</b>
5.1 Aplicaciones	37
5.2 Servicios de paquetería	40
5.2.1 Concepto de la aplicación	40
5.2.2 Estudio de la infraestructura necesaria	43
5.3 Ambulancia aérea	45
5.3.1 Concepto de la aplicación	45
5.3.2 Estudio de la infraestructura necesaria	47
5.4 Taxi aéreo	50
5.4.1 Concepto de la aplicación	50
5.4.2 Estudio de la infraestructura necesaria	51
<b>6 Aplicación de estudio: servicio de taxi aéreo en Madrid</b>	<b>57</b>
6.1 Justificación y planteamiento del caso práctico	57
6.2 Estudio meteorológico	63
6.2.1 Estudio de temperatura	63
6.2.2 Estudio de vientos	65
6.2.3 Estudio de precipitaciones	68
6.2.4 Estudio de visibilidad	69
6.3 Dimensionamiento de la infraestructura	70
6.3.1 Aeronave modelo de cálculo	70
6.3.2 Definición de áreas	71
6.3.3 Superficies limitadoras de obstáculos	73
6.3.4 Terminal de pasajeros	75
6.4 Estimación de potencia	77
6.5 Ayudas visuales	79
6.5.1 Indicador de dirección del viento	79
6.5.2 Señal de identificación del vertipuerto	80
6.5.3 Señal de área de toma de contacto	80
6.5.4 Señal de punto de toma de contacto y posicionamiento	80
6.5.5 Señales de puestos de estacionamiento	81
6.5.6 Luces	81
6.5.7 Faro de vertipuerto	81
6.5.8 Otros sistemas de iluminación	81
6.6 Distribución en planta	84
<b>7 Conclusión y líneas futuras</b>	<b>89</b>
<i>Bibliografía</i>	91

# Índice de Tablas

---

2.1	Ciudades europeas más congestionadas por el tráfico.[5]	6
2.2	Ciudades españolas más congestionadas por el tráfico.[5]	6
3.1	Características modelos eVTOL (configuración multirroto) [41] [42] [43]	22
3.2	Características modelos eVTOL (resto) [44] [45] [46] [47]	24
5.1	Características de reparto aéreo de última milla	41
5.2	Características del servicio de ambulancia aérea	47
5.3	Características del servicio de taxi aéreo	51
6.1	Distribución de vertipuertos en Madrid a largo plazo	59
6.2	Datos de la estación meteorológica “3195-Madrid, Retiro”	63
6.3	Temperaturas medias de Madrid	63
6.4	Promedio de temperaturas medias mensuales en Madrid	64
6.5	Temperaturas medias mensuales del mes más caluroso del año	64
6.6	Media de temperaturas máximas absolutas del mes más caluroso del año	64
6.7	Frecuencia de vientos según dirección y velocidad	66
6.8	Nº casos simultaneidad visibilidad y altura de nubes	69
6.9	Observaciones y frecuencias de visibilidad	69
6.10	Observaciones y frecuencias de techo de nubes	70
6.11	Dimensiones de los multicópteros de estudio[41] [42] [43]	71
6.12	Dimensiones de la aeronave de cálculo	71
6.13	Superficie de ascenso en el despegue	75
6.14	Estimación de potencia requerida	78
6.15	Dimensiones indicador dirección de viento	79





# Índice de Figuras

---

2.1	Tasa de urbanización mundial.[2]	5
2.2	Niveles de contaminación por tráfico rodado en la UE (2000-2017).[8]	7
2.3	Retos de la Movilidad Aérea Urbana (elaboración propia).	9
2.4	Proyecto H2020 AMU-LED.[21]	10
3.1	AV-8B Harrier II del Cuerpo de Marines de EEUU[23]	11
3.2	a)Multirroto, b)Ascensión y crucero, c)Rotor basculante[17]	15
3.3	Características aeronaves eVTOL (Elaboración propia, basado en [14] y [33])	15
3.4	Sistemas de almacenamiento electroquímicos esperados en el futuro [17]	16
3.5	Energía específica esperada para los distintos tipos de baterías [34]	17
3.6	Esquema de una pila de combustible [35]	17
3.7	Energía específica de los distintos sistemas de almacenamiento [17]	18
3.8	EHang 216 [41]	20
3.9	Volocopter VoloCity [42]	21
3.10	Airbus CityAirbus [42]	22
3.11	Wisk Cora[44]	23
3.12	Lilium Jet [45]	23
3.13	Joby S4 [47]	24
4.1	VoloPort presentado en Singapur en 2019 [61]	32
4.2	Maqueta del E-Port [65]	33
4.3	Diseño del Urban Air Port de Coventry [66]	34
4.4	Vertipuerto propuesto por Lilium para la operación del Lilium Jet [72]	35
5.1	Incorporación al mercado de las aplicaciones de estudio	39
5.2	Cuadro comparativo entre las distintas aplicaciones urbanas	39
5.3	EHang Falcon en servicios de paquetería con la compañía DHL [79]	41
5.4	Distribución de demanda diaria en reparto	42
5.5	Fases del vuelo en el reparto mediante drones	43
5.6	Vista isométrica del centro logístico adaptado al reparto mediante UAS	44
5.7	Vista en planta del centro logístico	45
5.8	Volocopter VoloCity adaptado a tareas EMS [85]	46
5.9	Vista isométrica de la instalación EMS	49
5.10	Distribución de la instalación EMS	49
5.11	Vista isométrica de la estación de taxi aéreo	54
5.12	Vista en planta de la estación de taxi aéreo	54
6.1	Posible red de vertipuertos en Madrid a largo plazo	59
6.2	Demanda horaria para las operaciones de taxi aéreo Atocha-Barajas	60
6.3	Comparación del tiempo de acceso al aeropuerto	61
6.4	Distribución de frecuencias del viento	65
6.5	Rosa de los vientos	67

6.6	Precipitación media anual	68
6.7	Precipitación media mensual	68
6.8	FATO, TLOF y SA	72
6.9	Anchura de la superficie de ascenso en el despegue/aproximación	74
6.10	Comparativa entre Performance Clase 1 y 2 (eje vertical x10)	74
6.11	Superficie de transición	75
6.12	Cargador Tesla V3 Supercharging [89]	78
6.13	Indicador de dirección del viento	79
6.14	Dimensiones mínimas de la señal de identificación del vertipuerto	80
6.15	Características de los destellos del faro de vertipuerto	81
6.16	Sectores HAPI	82
6.17	Luces perimetrales de FATO y TLOF	83
6.18	Separación mínima entre los puestos de estacionamiento	85

# Acrónimos

---

AAM	Advanced Air Mobility
AC	Alternating Current
AEA	All Electric Aircraft
AECOC	Asociación de fabricantes y distribuidores
AEMA	Agencia Europea del Medio Ambiente
ATM	Air Traffic Management
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CS	Certification Specification
DC	Direct Current
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EMS	Emergency Medical Services
eVTOL	Electric Vertical Take-Off and Landing
FAA	Federal Aviation Administration
FATO	Final Approach and Take-Off Area
GPS	Global Positioning System
HEMS	Helicopter Emergency Medical Service
IFR	Instrumental Flight Rules
LDP	Landing Decision Point
LiDAR	Light Detection and Ranging
MEA	More Electric Aircraft
MTOW	Maximum Take-Off Weight
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
NVFR	Night Visual Flight Rules
NVIS	Night Vision Imaging System
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OCU	Comunidad de Consumidores y Usuarios
OEW	Operating Empty Weight
OMS	Organización Mundial de la Salud
RPA	Remotely Piloted Aircraft
SA	Safety Area
SC	Special Condition
SERA	Standardised European Rules of the Air
SESAR	Single European Sky ATM Research
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
TDP	Take-Off Decision Point
TLOF	Alternating Current
UAM	Urban Air Mobility
UAS	Unmanned Aircraft System
UE	Unión Europea

UTM	Unmanned Aircraft System Traffic Management
VFR	Visual Flight Rules
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

# 1 Introducción

---

Nuestra sociedad siempre ha soñado con un sistema de movilidad aérea alternativo. Un sistema del que podamos hacer uso en la vida diaria y que sea flexible y práctico. Esta forma de transporte por aire rozaba, hasta ahora, el límite con la utopía. Sin embargo, la evolución tecnológica en el sector aeronáutico de la que es testigo el siglo XXI nos ha permitido ahora materializar esta lejana idea. ¿Nos encontramos ante un medio de transporte revolucionario que cambie por completo la forma de concebir el transporte urbano?

Los factores que impulsan el desarrollo de este nuevo medio de transporte son muy numerosos. Destacamos el crecimiento de la población y su concentración en ciudades, pues este es, en sí mismo, punto de partida de todas las causas: el crecimiento de los grandes centros urbanos conlleva la masificación e industrialización de estos, además de la visible congestión asociada al tráfico terrestre.

Además, unido a la congestión terrestre existente debemos sumar otro factor aún más preocupante. La contaminación atmosférica asociada al tráfico rodado es cada vez más acusada en las grandes ciudades, y en los últimos años tanto gobiernos como organismos competentes están tomando medidas para reducir esta problemática que afecta medioambientalmente y a la salud de la población. En este sentido, este nuevo concepto de movilidad, conocido como Movilidad Aérea Urbana (UAM, *Urban Air Mobility*), estará comprometido con el medio ambiente, tratando de llevar a cabo un transporte completamente eléctrico. Este proceso de electrificación no es nuevo en el sector aeronáutico y es que, además de limitar las emisiones perjudiciales, los sistemas eléctricos y electrónicos permiten reducir el peso de la aeronave y la probabilidad de fallo. Así, es evidente que este desarrollo tecnológico marcará en gran medida el recorrido de este nuevo medio de transporte.

No obstante, estas aeronaves también deberán cumplir una serie de requisitos funcionales que le permitan despegar y aterrizar en entornos urbanos donde el espacio disponible para la operación es limitado, algo que repercutirá en sus dimensiones y su performance. Las características de operación, junto con la búsqueda de un sistema propulsivo completamente eléctrico, harán de las aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) un nuevo concepto de aeronave que aúne todas las características que necesitamos para operar en entornos urbanos. Asimismo, se espera que vuelen a una altura menor que los vuelos comerciales actuales, siendo necesarios sistemas avanzados de detección de obstáculos, comunicaciones fiables y otros elementos tecnológicos que se irán comentando a lo largo del trabajo.

Pero dejando a un lado el factor tecnológico de las aeronaves, existe otra pieza igual de importante que debe encajar para que la UAM se convierta en un medio de transporte real y accesible a la población: la infraestructura terrestre. Esta infraestructura, conocida como vertipuerto, no solo tendrá la misión de dar soporte a las operaciones de las aeronaves eVTOL, sino que también tendrá la tarea fundamental de conectar a los ciudadanos con este nuevo medio de transporte. Por ello, pese a que habrá que tener en cuenta limitaciones importantes para la ubicación de estos vertipuertos, una adecuada localización dentro del mapa urbano tendrá un valor crucial para que este medio de transporte sea realmente competitivo y esté al alcance de la población.

Sin embargo, pese a las ventajas de este nuevo concepto de transporte, ¿a qué limitaciones debemos enfrentarnos antes de implantarlo en nuestras ciudades? Es cierto que existen una serie de limitaciones, tanto tecnológicas y regulatorias como relativas a la aceptación social del producto, todas ellas serán abordadas

más adelante. No en vano, aunque el coste de acceso al mercado es elevado y aún existen ciertas lagunas en cuanto al desarrollo esperado de la UAM, cada vez son más los fabricantes que están entrando en el sector de acuerdo a lo que consideran una inversión segura por el hecho de que pretende satisfacer una necesidad cada vez mayor en ciudades. Así, los avances que tengan lugar en los próximos años marcarán en gran medida el desarrollo de aeronaves e infraestructura que permitan la integración de una tercera dimensión para el transporte en ciudades.

## 1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo final de este proyecto es conocer los requerimientos necesarios que debe cumplir la infraestructura que dé soporte a las aeronaves eVTOL, enfocándolo primero de forma global y particularizando posteriormente en algunas de las aplicaciones de la UAM que mejor se adaptarían a las ciudades que conocemos hoy en día. Por tanto, más que un proyecto constructivo en sí, se trata de un proyecto de investigación e indagación acerca de todos los aspectos que rodean la UAM y las exigencias que nos supone a nosotros, como desarrolladores de infraestructura, este nuevo concepto de movilidad.

Se tendrán en cuenta las características y condicionantes de estas aeronaves, las actuales limitaciones en el sector, la previsión de mercado esperada y las posibles utilidades y diferentes conceptos que nos proporciona esta revolucionaria idea. Posteriormente, habiendo sentado las bases de las exigencias de estos vehículos, se llevará a cabo un estudio acerca de la infraestructura necesaria, la situación legislativa y la tendencia existente en algunos proyectos reales que están comenzando a plantearse. Por último, se aplicarán todos los conocimientos vistos a lo largo del trabajo en un caso práctico para una aplicación concreta de estudio, la de taxi aéreo, quizá la más popular y por la que la mayoría de inversores entran al mercado, pero que sin duda supone los mayores retos desde un punto de vista constructivo.

Cabe decir que, al tratarse de un tema novedoso con grandes posibilidades pero en el que las bases no están aún claramente definidas, este proceso investigativo y de búsqueda de información resulta básico para el posterior caso práctico que llevaremos a cabo. Por tanto, hay que aclarar que el grado de profundidad del caso práctico es limitado, tanto por el alcance previsto en un proyecto de este tipo, como por las constantes evoluciones que rodean a este nuevo concepto de movilidad. Sin embargo, a lo largo de todo el trabajo se irán comentado todos aquellos puntos que requieran un estudio de detalle en proyectos posteriores.

En resumen, el presente análisis cubre las siguientes áreas de actuación:

- Identificar los retos y condicionantes que supone el crecimiento de la Movilidad Aérea Urbana, así como los efectos nocivos en la población que han provocado su desarrollo.
- Estudiar las características generales y el funcionamiento de las aeronaves eVTOL, analizando sus posibles limitaciones y la previsión de fabricantes e inversores.
- Analizar las necesidades de la población y la contextualización en el entorno urbano de los vertipuertos como punto de conexión entre los ciudadanos y este nuevo medio de transporte.
- Conocer los aspectos legislativos que rodean al diseño y construcción de vertipuertos urbanos, y estudiar el proceso de adaptación de la normativa existente a estas aeronaves.
- Analizar las distintas aplicaciones que puede tener la movilidad avanzada en entornos urbanos y las necesidades constructivas que cada una de ellas presenta.
- Transformar estos requerimientos teóricos en un caso práctico de diseño de la infraestructura para la aplicación de taxi aéreo en la ciudad de Madrid.

## 1.2 Estructuración del proyecto

Además de una parte introductoria y otra conclusiva, el proyecto se conforma de capítulos que profundizarán en el entendimiento de la Movilidad Aérea Urbana, organizados de lo general a lo particular.

Tras la presente introducción, el segundo capítulo analiza con detalles las causas que han provocado el desarrollo de una tercera dimensión para la movilidad urbana y las reticencias que esta innovadora idea puede provocar. Se analizarán los distintos retos que afronta este crecimiento y se tratará de realizar un enfoque general de las posibles soluciones y los proyectos que actualmente se están llevando a cabo.

En el tercer capítulo, se estudiarán con detalle todas las características que deben cumplir las aeronaves eVTOL para que realmente tengan la funcionalidad necesaria para operar en entornos urbanos. Se comentarán las distintas vertientes de estas aeronaves y el uso previsto para cada una de ellas, los sistemas de almacenamiento sostenibles en los que se está trabajando, las empresas que están llevando la iniciativa y las premisas bajo las que se están fabricando.

En el cuarto capítulo, se contextualizará la infraestructura necesaria para la operación a las aeronaves eVTOL dentro del entorno urbano, analizando las necesidades de la población y estudiando los contenidos mínimos con los que deben cumplir los vertipuertos. Asimismo, se comentarán varios proyectos esperados de vertipuertos, algunos aún lejanos, y el enfoque que los desarrolladores de infraestructura le están dando a esta nueva herramienta.

En el quinto capítulo, una vez hayamos realizado un análisis global de todos los aspectos que rodean a la UAM, se estudiarán las posibles aplicaciones y las grandes ventajas que ofrece este medio de transporte, particularizando para aquellas aplicaciones que mejor se adaptan al entorno urbano y que suponen una gran revolución con respecto a sus competidores. Para estas aplicaciones, se realizará un estudio de la infraestructura necesaria y las condiciones que debe cumplir en términos de localización, superficie o instalaciones eléctricas.

En el sexto capítulo, se pondrán en práctica todos los conocimientos adquiridos a lo largo del proyecto, centrándonos en una aplicación concreta, la de taxi aéreo, y estudiando todas las necesidades constructivas que supone la materialización de una estación de aerotaxis en la ciudad de Madrid.

Por último, en el séptimo capítulo se realizará un balance final: retos, limitaciones, soluciones y las posibles líneas futuras de un medio de transporte revolucionario.





## 2 Movilidad Aérea Urbana

---

En este primer apartado se pretende realizar un balance general de la situación actual del transporte urbano y los aspectos negativos que trae asociados para la población. Este hecho marcará la entrada de un nuevo medio de transporte con objeto de solucionar la problemática, pero a su vez, trae consigo importantes retos que no deben ser olvidados.

### 2.1 Problemática actual en ciudades

Es un hecho que cada vez más personas se trasladan a vivir a las ciudades en busca de nuevos retos y oportunidades. La tendencia parece clara, y así lo demuestra la tasa de urbanización mundial, que ha pasado de ser de un 39% de la población total en 1980 a situarse actualmente en un 56%. No obstante, el crecimiento esperado es aún mayor, y es que existen estudios que afirman que cerca de 7 de cada 10 personas vivirán en ambientes urbanos en el año 2050.[1]

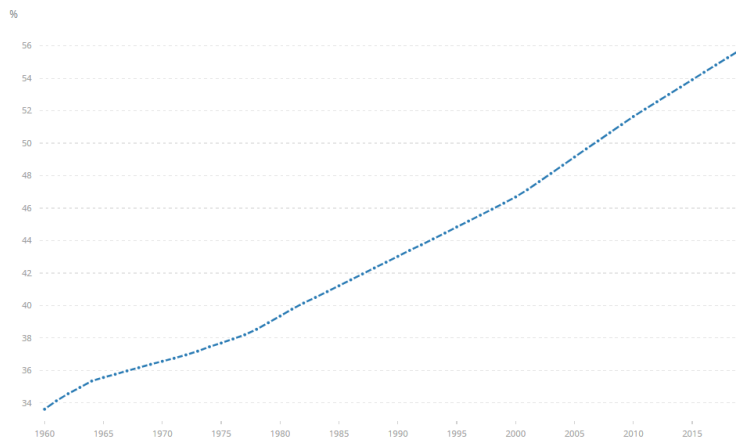


Figura 2.1 Tasa de urbanización mundial.[2].

Sin embargo, este crecimiento lleva aparejado grandes desafíos, especialmente en términos de infraestructura terrestre. Actualmente la infraestructura existente no es capaz de absorber y satisfacer la demanda que se produce en las horas punta del día, provocando grandes atascos tanto en los centros de las ciudades como en las vías de acceso a las mismas. Esto conlleva efectos perjudiciales para la población, especialmente en términos de tiempo y de salud.

Es indudable que la movilidad es uno de los aspectos más importantes en ciudades, y la canalización adecuada del tráfico constituye uno de los principales retos de los últimos tiempos. Actualmente la mitad de los espacios públicos de las ciudades están ocupados por carreteras, pero la constante emigración hacia las ciudades y la importancia del coche como medio de transporte hace que esto no sea suficiente. De hecho, el

43.2% de los europeos manifiestan que tardan más de 1 hora en ir y volver de su trabajo. En este sentido, la compañía holandesa fabricante de navegadores Tom Tom elabora anualmente un estudio (Tom Tom Traffic Index) acerca de las ciudades del mundo que presentan una mayor nivel de congestión. En el mismo, vemos como ciudades densamente pobladas de países en los que la infraestructura no está del todo preparada ocupan los primeros puestos. Si nos centramos en el ámbito europeo, los resultados más representativos son los que se muestran en la siguiente tabla.[3][4]

**Tabla 2.1** Ciudades europeas más congestionadas por el tráfico.[5].

Ciudad	Congestión 2020	Congestión 2019	Hora punta	Posición mundial
Moscú	54 %	59 %	118 %	1
Estambul	51 %	55 %	96 %	5
Kiev	51 %	53 %	101 %	7
Bucarest	42 %	52 %	73 %	18
Dublín	38 %	48 %	70 %	21
Cracovia	36 %	45 %	77 %	27
Atenas	34 %	43 %	94 %	36
París	32 %	39 %	79 %	42
Londres	31 %	38 %	58 %	49
Sofía	30 %	36 %	58 %	53
Berlín	30 %	32 %	47 %	58
Bruselas	29 %	38 %	61 %	65
Roma	27 %	38 %	63 %	79

Así, se estima que un ciudadano londinense emplea de media 20 minutos extra por cada trayecto. Esto implica que de media en la ciudad de Londres se empleen más de 149 horas adicionales al año en los desplazamientos urbanos.

Las ciudades españolas se encuentran lejos de los primeros puestos del ranking, pero el efecto sigue siendo muy perjudicial. Atendiendo al informe realizado a mediados de 2020 por la Asociación de Fabricantes y Distribuidores (AECOC), el coste económico derivado de los atascos urbanos en las ciudades españolas y las consecuencias asociadas se encuentra entre los 15.1 y los 23.8 mil millones de euros anuales, representando el 2% del PIB.[6]

**Tabla 2.2** Ciudades españolas más congestionadas por el tráfico.[5].

Ciudad	Congestión 2020	Congestión 2019	Hora punta	Posición mundial
Barcelona	22 %	29 %	48 %	164
Granada	20 %	25 %	52 %	193
Sta Cruz de T.	18 %	23 %	46 %	243
Valencia	17 %	20 %	39 %	271
Palma de M.	16 %	24 %	34 %	294
Santander	16 %	17 %	27 %	299
Murcia	16 %	21 %	36 %	300
A Coruña	15 %	19 %	34 %	312
Las Palmas	15 %	18 %	42 %	314
Madrid	15 %	23 %	33 %	316

Cabe resaltar que los resultados obtenidos en el pasado año no son del todo significativos fruto de las restricciones COVID, pero si tomamos los datos referentes a 2019 tanto Madrid como Barcelona se encontraban entre las 50 ciudades más congestionadas del mundo. Además, la velocidad media en los centros urbanos fue de 13 y 14 km/h, respectivamente, unos valores por debajo de ciudades mucho más congestionadas, como pueden ser Moscú, París o Berlín.[6]

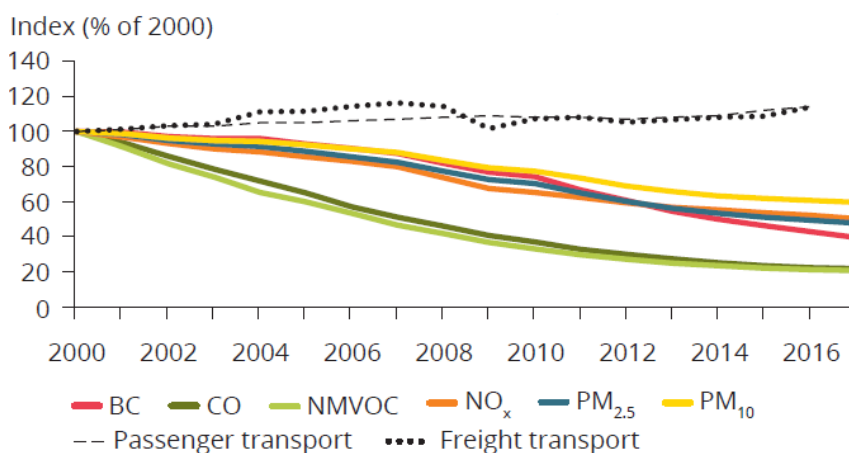
No obstante, el principal problema de la movilidad urbana es la contaminación atmosférica que lleva aparejada. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en la Unión Europea (UE) cerca del 90% de la población urbana se encuentra expuesta a concentraciones de contaminantes atmosféricos por encima de los valores

recomendados. Contaminantes como las partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), el ozono troposférico ( $O_3$ ), el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) o el benzo( $\alpha$ )pireno (BaP) causan cada año 4.2 millones de muertes prematuras en todo el mundo. Las partículas en suspensión son un buen indicador de la contaminación del aire, aunque particularmente las PM2.5 son potencialmente más perjudiciales, pudiendo incluso atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo.[7]

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) en su informe anual acerca de la calidad del aire, en 2019 se produjeron en España 23000 muertes prematuras debido a las PM2.5, 6800 debidas al  $NO_2$  y 1800 asociadas al  $O_3$ . Esto supone que más de un 70% de las muertes prematuras están asociadas a las partículas pequeñas de 2.5 micras o menos de diámetro. Sin embargo, el efecto del  $NO_2$  no es para nada despreciable, y es que atendiendo al estudio revelado en enero de 2021 por el Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal), Madrid es la ciudad europea con más muertes debidas al  $NO_2$ . Sin duda se trata de un dato revelador, puesto que la presencia de este gas se atribuye principalmente al tráfico.[8][9][10]

Además, el otro aspecto importante de la contaminación producida por los transportes está asociado con las emisiones de efecto invernadero. Se estima que las emisiones de dióxido de carbono  $CO_2$  son responsables de casi el 30% de los gases de efecto invernadero en la UE. En particular, el tráfico rodado es causante del 12% del  $CO_2$  de la UE. Es por ello que tanto gobiernos como organismos internacionales están tomando medidas exigentes con el fin de reducir las emisiones contaminantes. La Comisión Europea presentó en diciembre de 2020 la Estrategia para una Movilidad Inteligente y Sostenible, mediante la que tratará de adaptar la movilidad a las exigencias actuales y conseguir reducir las emisiones de  $CO_2$  en un 90% del sector del transporte en 2050. La iniciativa entra dentro del Pacto Verde europeo, y en ella se pretende que haya 30 millones de coches cero emisiones en Europa en el año 2030.[11]

En España, el Ministerio de Transición Ecológica propuso el Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica (PNCCA), el cual se aprobó el 27 de septiembre de 2019 y servirá para reducir los niveles de contaminación en ambientes urbanos en un 35% en los próximos 10 años.[12]



**Figura 2.2** Niveles de contaminación por tráfico rodado en la UE (2000-2017).[8].

Dado el elevado nivel de congestión en las grandes ciudades y la preocupante contaminación atmosférica, el desarrollo de una tercera dimensión para un transporte eficiente y sostenible en núcleos urbanos está tomando cada vez más cuerpo. De este modo, la Movilidad Aérea Urbana (Urban Air Mobility, UAM) propone una situación revolucionaria en el sector del transporte tal y como lo habíamos concebido hasta el día de hoy, permitiendo el transporte de pasajeros y carga en áreas densamente pobladas y trayectos interurbanos, dando lugar a un concepto de ciudad inteligente y cada vez más integrada.

La Comunidad de Consumidores y Usuarios (OCU) realizó un estudio en el año de 2018 en el que afirmaba que en nuestro país, pese a que debería ser la última opción en entornos urbanos, el automóvil sigue ocupando la primera posición como medio de transporte más utilizado. Más del 30% de los ciudadanos afirma que sigue empleando su propio utilitario de 5 a 7 días por semana, y esta elección radica fundamentalmente en

términos de duración del recorrido y la comodidad. Por tanto, resulta evidente que necesitamos revertir la situación y, además de cumplir con los objetivos medioambientales citados anteriormente, este nuevo medio de transporte debe proporcionar al ciudadano ventajas tangibles que realmente le hagan decantarse por esta opción.

## 2.2 Retos de la Movilidad Aérea Urbana

Dejando a un lado las grandes ventajas que ofrece, la UAM trae consigo importantes retos que deben ser estudiados cuidadosamente. La integración en una ciudad densamente poblada y con grandes limitaciones de espacio en tierra de una infraestructura capaz de soportar la demanda de operaciones prevista, así como la posible integración con la aviación tripulada tal y como la conocemos hoy en día, hacen que el panorama de la UAM no esté del todo definido en la actualidad. Esta podría ser una de las mayores limitaciones en el corto plazo en términos de infraestructura, puesto que normalmente diseñamos y construimos una infraestructura de acuerdo a unos determinados requisitos, y en este caso son los requisitos los que se van a ir desarrollando en paralelo. Por tanto, la presente década (2020-2030) marcará las directrices en términos de estandarización e integración de este nuevo concepto de transporte urbano.

De acuerdo con el limitado espacio para las operaciones de despegue y aterrizaje, los vehículos de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) suponen una solución idónea para operaciones en entornos urbanos. Estos podrán ser autónomos o pilotados, y si las evoluciones tecnológicas lo permiten, completamente eléctricos (eVTOL). Actualmente existen más de 300 modelos de VTOL en desarrollo, y tanto EASA como FAA están marcando la hoja de ruta para la certificación de los mismos. No obstante, el resto de parámetros de la UAM deben ser aún definidos para que puedan operar de forma eficiente y segura.[13]

Los requerimientos de estos vehículos, junto a las grandes limitaciones en términos de espacio disponible en entornos urbanos marcarán el desarrollo de la infraestructura necesaria, conocida como vertipuertos.

Por otro lado, quizá el aspecto más crítico a tener en cuenta será el desarrollo de un sistema de gestión del tráfico aéreo no tripulado (UTM) eficiente que permita la operación de drones y otros vehículos aéreos no tripulados de forma segura a una altitud menor de la que lo hace la aviación convencional. La complementación entre UTM y la gestión del tráfico aéreo tal y como la habíamos concebido hasta el día de hoy (ATM) permitirá aumentar el volumen de operaciones y garantizar la seguridad aérea urbana. Para ello, nuevas redes de comunicación en desarrollo, y especialmente la tecnología 5G, tendrán un papel fundamental para aumentar las posibilidades de la UAM.[14]

De este modo, los pilares en los que se debe basar la UAM pueden enmarcarse dentro de los siguientes puntos[73]:

- **Autónoma.** De esta forma se permite liberar una plaza en las aeronaves y se elimina el factor humano como fuente principal de accidentes. Los vehículos empleados en la UAM, por tanto, deberán disponer de sistemas redundantes e inteligentes capaces de operar bajo cualquier situación. Del mismo modo, se consigue una maximización de la eficiencia ligada a la reducción de los costes de tripulaciones y elementos asociados.
- **Segura y eficiente.** Para que sea realmente competitiva, la UAM deberá garantizar un servicio más rápido que el de los medios de transporte existentes en la actualidad. A su vez, al igual que en la aviación comercial, altos estándares de seguridad deben garantizarse para que los vuelos puedan llevarse a cabo.
- **Control centralizado.** A diferencia del viaje individualizado e independiente que ofrecen los automóviles actuales, la UAM dispondrá de un sistema de soporte central mediante una plataforma de control y gestión que asegurará un tráfico aéreo fluido y la toma adecuada de decisiones.
- **Sostenible.** El punto central de la UAM y la principal ventaja con respecto a la mayoría de medios de transporte parte de la reducción de la contaminación gracias a los vehículos cero-emisiones y eléctricamente propulsados.



En Europa, la integración segura de las operaciones UAM en las ciudades está siendo tenida muy en cuenta. El 26 de febrero de 2021 el Comité de EASA aprobó el entorno regulatorio U-Space, que aplica a los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y con el que se pretende la integración de todo tipo de aeronaves en el espacio aéreo de forma segura y la creación de un sistema que flexibilice la demanda creciente en el sector. Durante la fase inicial, el U-Space delimitará el uso de drones a un espacio aéreo restringido, segregado y completamente definido, dejando para etapas posteriores las operaciones en todos los entornos operativos y espacios aéreos [18][74]. Por otra parte, proyectos como el AMU-LED (proyecto H2020 de la UE) pretenden demostrar los beneficios de la UAM frente al transporte convencional. En este proyecto participan 17 entidades tanto europeas como estadounidenses, y tiene previsto realizar en el próximo año demostraciones de los servicios UAM en las ciudades de Santiago de Compostela, Cranfield (Reino Unido) y Amsterdam y Rotterdam (Países Bajos). El proyecto AMU-LED queda enmarcado dentro de la iniciativa SESAR, la cual pretende modernizar la gestión del tráfico aéreo en Europa, siendo la UAM una pieza clave en este desarrollo.[21]

Las operaciones con drones aumentaron un 207% en el espacio aéreo español durante el año 2020 con respecto al año anterior, y un 362% con respecto a 2018, y actividades y estudios innovadores están desarrollándose en nuestro país [74]. Además del AMU-LED, otros proyectos como el CORUS-XUAM, iniciado el 12 de enero de 2021 y que pretende realizar demostraciones en ciudades de 7 países diferentes (entre ellas Castelldefels, Barcelona), o el USpace4UAM que tendrá lugar en Villacarrillo, Jaen, son muestra de ello.

En cualquier caso, es evidente que nos encontramos ante un proceso de cambio, y es que se espera que a partir de 2025 el mercado de la movilidad aérea crezca exponencialmente y nosotros, como sociedad, debemos estar preparados para ello.



Figura 2.4 Proyecto H2020 AMU-LED.[21].

### 3 Aeronaves eVTOL

---

Las limitaciones de espacio para realizar las operaciones en entornos urbanos altamente edificados marcarán uno de los principales factores para el diseño de las aeronaves a emplear dentro de la UAM. En este sentido, resulta evidente que los dispositivos VTOL (Vertical Take-Off and Landing), aquellos con propiedades que les permiten despegar y aterrizar verticalmente, son los más adecuados dadas las características previstas para esta nueva modalidad de transporte.

Pese a encontrarnos en una época de crecimiento dentro de la movilidad aérea avanzada, las aeronaves con características VTOL no suponen nada nuevo dentro del panorama de la aviación. Y es que ya en 1928 fueron concedidas las primeras patentes a Nikola Tesla para vehículos de transporte aéreo con funciones VTOL. Años más tarde, a finales de la década de los 50, se comenzó a introducir en el diseño de cazas militares con el objeto de controlar posibles ataques con bombas sobre aeródromos. Con esto se trataba de poder operar sobre zonas no del todo preparadas, haciendo del vuelo en estacionario una de las mayores ventajas de los VTOL. Pero más allá de las ventajas que ofrecían estas aeronaves, el coste de implantación era enorme en comparación con otras alternativas y en el transcurso de los años 60 el desarrollo de estas características descendió de forma notable. [22]



**Figura 3.1** AV-8B Harrier II del Cuerpo de Marines de EEUU[23].

Aunque, sin lugar a dudas, la aeronave más común habitualmente introducida dentro del grupo VTOL es el helicóptero. Estos son propulsados por un rotor principal y uno de cola. El rotor principal, situado en la parte superior central, es el que permite la elevación de la aeronave en la maniobra de despegue, siendo el rotor de cola el que girando en sentido contrario se encarga de contrarrestar los momentos generados. Pese a que ya desde los años 20 se estaban realizando constantes investigaciones acerca de los helicópteros, no fue hasta 1942 cuando Igor Sikorsky diseñó y fabricó el primer helicóptero controlable en vuelo y producido en cadena. Asimismo, desde un punto de vista técnico, el autogiro inventado años antes (1920) por Juan de la Cierva no está considerado una aeronave VTOL como tal, puesto que requería una aceleración previa en

tierra para el despegue. [24]

Este desarrollo de modelos VTOL hizo que el concepto de “coche volador”, lejos de ser una utopía, se intentase llevar a la práctica. El ingeniero americano Molt Taylor diseñó y fabricó en 1949 el Aerocar [25], que tras diversas pruebas en carretera y aéreas llegó incluso a ser aprobado por la Autoridad de Aviación Civil (AAC), pero finalmente no se produjo en masa. Otros proyectos con un objetivo similar se fueron desarrollando en años posteriores, como el Volante Tri-Athodyne de la compañía Ford, los “jeeps voladores” que el Ejército de los EEUU trató de introducir en 1956 o el Sky Commuter diseñado por Flight Innovation Inc. en la década de los 80, aunque finalmente todos ellos fueron abandonados. Sin embargo, no ha sido hasta estas últimas décadas cuando las aeronaves VTOL han experimentado un crecimiento realmente útil y eficiente para los retos que se deben afrontar en la UAM. [26] [27]

En cierto modo, podríamos preguntarnos el por qué del desarrollo de dispositivos con funciones relativamente parecidas a los helicópteros convencionales. La principal causa radica fundamentalmente en la seguridad. El hecho de que las aeronaves VTOL en desarrollo tengan de forma general una disposición multirrotor de gran redundancia, unido a la multifuncionalidad de los mismos hace que los nuevos dispositivos estén dotados de gran estabilidad y una probabilidad de fallo menor, puesto que podría seguir volando incluso con varios motores fuera de servicio. Técnicamente, las aeronaves VTOL a emplear en la UAM son más sencillas y eficientes que los helicópteros, tratando de evitar los complejos sistemas de control mecánicos por un sistema de control *fly-by-wire* que permite una gran funcionalidad e integración.

Además de la seguridad, esta nueva generación de aeronaves debe tener en cuenta otros criterios cada vez más importantes como son el control de emisiones nocivas y la contaminación acústica en entornos urbanos. Es por ello que la mayoría de VTOL actualmente en fase de diseño serán eléctricos, dando lugar a las aeronaves eVTOL (electrical Vertical Take-Off and Landing). Esto permitirá no solo reducir la polución existente, sino que también jugará un papel importante en términos de aceptación social y bienestar ciudadano. Así, conceptos como el MEA (More Electric Aircraft), el AEA (All Electric Aircraft) o el ya comentado sistema de control *fly-by-wire*, mediante el cual se reemplazan los controles manuales por una interfaz electrónica, adquieren cada vez más importancia.

Sin embargo, considerando las características para el despegue y el aterrizaje de estas aeronaves, la transición que se está llevando a cabo en el sector hacia aeronaves automatizadas o semi-automatizadas no será menos importante en el ámbito de la UAM. Siguiendo con este aspecto, el crecimiento y evolución de los UAV (Unmanned Aerial Vehicle) y RPA (Remotely Piloted Aircraft) marcará indiscutiblemente una implantación realmente útil y eficiente de lo que es la UAM que todos tenemos en mente. Ya no sólo por el hecho de un ahorro de peso y la posibilidad de incluir un pasajero adicional que no sería posible si existiera piloto a bordo, sino también por la reducción de costes asociada (ahorro del coste de tripulación) y la expansión de la envolvente de vuelo. Pese a que UAV y RPA son términos se suelen emplear indistintamente, existen matices a tener en cuenta si no se quiere llegar a confusión en este periodo de auge.

Si atendemos a la definición que aporta OACI en este sentido, UAV es un término ya obsoleto para referirse a los vehículos aéreos no tripulados, siendo más adecuado en este caso el término UAS (Unmanned Aerial System):

«UAS. Aeronave y sus elementos conexos que operan sin piloto a bordo.»[28].

Es decir, además de la aeronave también se refiere al enlace de comunicaciones y la estación en tierra. Mientas tanto, atendiendo al Manual de RPAS de OACI, una RPA es una “aeronave no tripulada que es pilotada desde una estación de pilotaje a distancia”; incluyendo el término RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) no solo a la aeronave, sino también a la estación de pilotaje y los enlaces requeridos para el correcto desarrollo de la operación:

«RPAS. Aeronave pilotada a distancia, su estación o estaciones conexas de pilotaje a distancia, los enlaces requeridos de mando y control y cualquier otro componente según lo especificado en el diseño de tipo.» [29]

Por tanto, en el caso de RPA o RPAS se menciona expresamente la existencia del piloto que opera la aeronave de forma remota utilizando un enlace de comunicaciones adecuado, pero en el caso de un UAS solamente se especifica que este no se encuentra a bordo, pudiendo existir o no. Lo que parece evidente es



que los dispositivos eVTOL, ya sea pilotados a bordo, remotamente pilotados o autónomos, marcarán en gran medida una exitosa introducción de la UAM en las ciudades tal y como las conocemos hoy en día.

La siguiente cuestión sería analizar en qué categoría podemos enmarcar los dispositivos eVTOL y las regulaciones existentes para los mismos. Actualmente no existe ninguna legislación específica para eVTOL, por lo que deben ser encuadrados dentro de la regulación existente y nos encontramos ante un vacío legal que debe ser estudiado cuidadosamente. Es evidente que estos dispositivos entran dentro de la categoría de aeronave de acuerdo a la definición de OACI:

*«Aeronave. Toda máquina que pueda sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra.» [30]*

El siguiente pensamiento podría ser considerar que por características y función, los eVTOL destinados a la UAM podrían incluirse dentro de la categoría de helicópteros. Si atendemos de nuevo a la definición de OACI:

*«Helicóptero. Aerodino más pesado que el aire, que se mantiene en vuelo principalmente en virtud de la reacción del aire sobre uno o más rotores propulsados por motor, que giran alrededor de ejes verticales o casi verticales.» [30]*

Por tanto, atendiendo a este concepto las aeronaves eVTOL no podrían considerarse propiamente como helicópteros, en tanto en cuanto no todos los eVTOL están formados por rotores en posición vertical.

EASA (European Union Aviation Safety Agency), en ausencia de una regulación específica para la certificación de aeronaves eVTOL y tras numerosas solicitudes para ello, publicó el 2 de julio de 2019 su Condición Especial para VTOL de categoría pequeña (SC-VTOL) [31], donde se establecen los estándares de aeronavegabilidad a cumplir por este nuevo concepto de aeronave que difiere de los helicópteros convencionales o las aeronaves de ala fija. EASA indica en la SC-VTOL:

*«La agencia ha recibido una serie de solicitudes para la certificación de tipo de aeronaves de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), que difieren de las aeronaves de ala fija o helicópteros convencionales. En ausencia de especificaciones de certificación para la certificación de tipo de este tipo de producto, se ha desarrollado un conjunto completo de especificaciones técnicas específicas en forma de condición especial para aeronaves VTOL. Esta condición especial aborda las características únicas de estos productos y prescribe estándares de aeronavegabilidad para la emisión del certificado de tipo, y cambios a este certificado de tipo, para una aeronave VTOL que transporta personas en la categoría pequeña, con unidades de elevación/empuje utilizadas para generar elevación y control.»*

En la misma, EASA establece una distinción entre los eVTOL y el resto de aeronaves convencionales:

*«La diferencia con los aviones convencionales está basada en la capacidad VTOL de la aeronave, mientras que la diferencia con los helicópteros convencionales está basada en el uso de una propulsión distribuida, específicamente cuando más de 2 unidades de elevación/empuje son usadas para proporcionar elevación durante el aterrizaje o el despegue vertical.»*

EASA también indica que esta condición especial pretende ser compatible con la capacidad de pilotaje remoto y los diferentes grados de autonomía, pese a que son aspectos que no se definen en la misma. Esto nos muestra, por tanto, que la intención de EASA es establecer las bases para la certificación de estas aeronaves distintas a las que actualmente conocemos, pero mientras los avances en el sector eVTOL son continuos y se prepara una Especificación de Certificación (SC) adecuada, la SC-VTOL marcará las disposiciones en términos regulatorios de estas aeronaves.

La SC-VTOL incluye aspectos tanto de la CS-23 como de la CS-27, y aplica a todo VTOL que transporte personas cuyas unidades de elevación y empuje se empleen para generar elevación y control, y que tengan una configuración máxima de 9 pasajeros y un peso al despegue inferior a 3175 kg. A su vez, se distingue entre dos categorías de certificación:

- Básica. Para operaciones no comerciales y de menor riesgo.

- Mejorada. Para vuelos sobre áreas más pobladas u operaciones comerciales.

Por otro lado, la FAA (Federal Aviation Administration), otro de los organismos regulatorios más importantes de la aviación mundial, está llevando a cabo un planteamiento opuesto al de EASA en cuanto a la certificación de aeronaves VTOL. La FAA plantea considerar las aeronaves eVTOL como categorías especiales dentro de la regulación existente, según si vuela durante la mayor parte de su vuelo sobre ala fija (Parte 23) o si bien opera a través de sus rotores (Parte 27). [32] Lo que está claro es que ambos puntos deben ser coordinados, puesto que una adecuada armonización de los aspectos regulatorios y técnicos será fundamental para la adecuada integración de las aeronaves eVTOL en el mercado.

### 3.1 Tipología de aeronaves VTOL

Si bien todas ellas guardan en común las propiedades citadas anteriormente, podríamos clasificar las aeronaves eVTOL según sus características aerodinámicas. Así, podríamos distinguir entre tres posibles configuraciones:

- **Multirrotores.** Desde un punto de vista técnico, se trata del sistema más sencillo. Está formado por un conjunto de hélices para el ascenso vertical, las cuales permiten equilibrar los momentos girando en sentidos opuestos. Las hélices se mantienen en una posición fija durante todo el vuelo. Esto los convierte en aeronaves realmente eficientes en el vuelo estacionario, pero tienen la desventaja de que la eficiencia baja considerablemente durante el crucero, teniendo una velocidad máxima de unos 90 km/h [14]. Cada hélice presenta un sistema eléctrico independiente que permite un gran nivel de redundancia.

Por otra parte, debido a la baja eficiencia en crucero presentan un alcance no mayor a 50 km. Sin embargo, aún así están considerados como una alternativa viable a los helicópteros convencionales debido a que producen un ruido menor, menos emisiones contaminantes, presentan una mayor redundancia y se espera que sean más económicos (coste de uso alrededor de 10 veces menor a los helicópteros [33]). Debido a su limitado alcance, es previsible que opere en rutas preestablecidas y mayoritariamente en vuelos intraurbanos.

- **Elevación y crucero.** Combina la configuración multirrotores con otra hélice cuyo eje se encuentra dispuesto horizontalmente, de forma que le confiere un empuje directo en la dirección del vuelo. Pueden alcanzar velocidades de hasta 250 km/h y con un alcance mayor que el de los multirrotores, llegando incluso hasta los 200 km. No obstante, presentan una mayor complejidad y el tiempo de certificación previsto es mayor.

Las ventajas en términos de alcance y autonomía hace que este tipo de eVTOL permita cualquier tipo de ruta, pudiendo abarcar tanto vuelos intraurbanos como interurbanos.

- **Rotor basculante (“Tilt concept”).** También denominado de empuje vectorial, se trata del concepto de eVTOL más complejo desde el punto de vista técnico. Está formado por un sistema de propulsión dispuesto verticalmente durante la maniobra de despegue vertical, los cuales posteriormente son girados hasta una posición horizontal para generar el empuje en la dirección adecuada. Se trata sin lugar a dudas del eVTOL con mayores posibilidades para trayectos largos, pudiendo alcanzar velocidades de hasta 300 km/h y con un alcance alrededor de los 300 km.

El hecho de que cada rotor deba disponer de su propio actuador, y estos a la vez tengan que ser completamente redundantes hace que sea una solución costosa, con un peso mayor y con un proceso de certificación más lento. Sin embargo, tal y como se ha comentado, son idóneos para realizar trayectos entre distintas ciudades.

Desde un enfoque regulatorio, los eVTOL de tipo multirrotores tendrán una certificación más rápida y serán los primeros en introducirse en el mercado. Mientras tanto, los eVTOL de elevación y crucero y de rotor basculante tendrán un desarrollo más lento, en tanto en cuanto que no se han alcanzado aún unos estándares



Figura 3.2 a) Multirrotor, b) Ascensión y crucero, c) Rotor basculante [17].

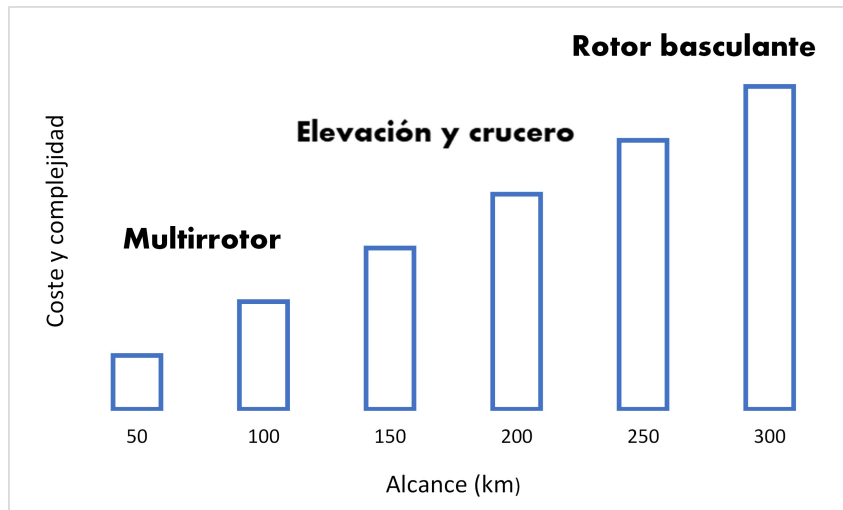


Figura 3.3 Características aeronaves eVTOL (Elaboración propia, basado en [14] y [33]).

aceptables de seguridad para el transporte de personas bajo condiciones adversas. En cualquier caso, uno de los conceptos común a todas las aeronaves de este tipo, tal y como hemos podido ver, es el de la propulsión distribuida. Esta se basa en la repartición del empuje entre los distintos rotores, con el fin de mejorar la maniobrabilidad y permitir un despegue y aterrizaje en el menor espacio posible. Además, repercute en una mejora de la eficiencia de la aeronave y una reducción del ruido.

Por otro lado, las características que actualmente ofrecen estos dispositivos tienen mucho margen de mejora y la evolución técnica en el sector marcará en los próximos años su adecuada introducción en el entorno UAM. Especialmente en términos de duración y densidad de energía de las baterías, las cuales está previsto que sean el sistema principal de alimentación, y que actualmente suponen la mayor limitación dado que el alcance que proporcionan es insuficiente para la mayoría de operaciones previstas con aeronaves eVTOL. Por ello, sistemas adicionales a los de baterías puros también deben ser considerados, como soluciones híbridas para la generación de energía (pilas de hidrógeno especialmente), una de las opciones más prometedoras de cara al futuro. Este hecho será analizado con más detalle en el siguiente apartado.

## 3.2 Sistemas de almacenamiento

Conociendo los grandes problemas ambientales que afrontamos como sociedad y la tendencia a evolucionar hacia un sector cada vez más sostenible, una de las mayores ventajas de las aeronaves eVTOL radica en su propulsión eléctrica. Actualmente soluciones como las pilas de combustible y baterías que realmente sean eficientes se encuentran en procesos de desarrollo, aunque su integración en el sector aeronáutico no es sencilla dados los requisitos tan elevados que se deben imponer. Sin embargo, no debemos perder de vista que la elección y el desarrollo de un sistema de propulsión adecuado constituye un factor crítico para el desarrollo de un eVTOL confiable y realmente útil y rentable para realizar vuelos de mayor distancia y durante un tiempo más prolongado.

Uno de los parámetros más importante a tener en cuenta en los sistemas de almacenamiento de energía es la energía específica. La energía específica, expresada generalmente en Wh/kg o kWh/kg, es la energía que un

sistema puede almacenar por unidad de peso. Así, por ejemplo el queroseno Jet A1 empleado en aviación tiene una energía específica de aproximadamente 11.9 kWh/kg. El objetivo actual no es otro que obtener soluciones alternativas y sostenibles que se acerquen en la medida de lo posible a este valor.

Los sistemas de alimentación sobre los que se basan las aeronaves VTOL pueden ser de diverso tipo. A continuación se desarrollan:

- **Sistemas de propulsión convencionales.** Se basan en una turbina o un motor de pistón donde se quema un combustible líquido (queroseno) para la generación de energía. De este modo, la turbina alimentaría a un generador que posteriormente produciría la energía eléctrica requerida. Aunque ha sido el sistema tradicionalmente empleado y presenta grandes ventajas, especialmente debido a alta energía específica que posee el combustible, muchos fabricantes y el sector de la aviación en general pretenden reducirlos al máximo dada la contaminación asociada.

El alcance de las aeronaves es considerablemente superior al de los sistemas de propulsión eléctricos, lo que hace que sea una solución a tener en cuenta en el corto plazo en aplicaciones como los servicios de rescate y emergencia, donde un alcance y una autonomía elevados deben ser garantizados. Por otra parte, otro aspecto positivo es que el peso de la aeronave va disminuyendo a medida que se va quemando el combustible, lo que hace que el consumo vaya reduciéndose durante el vuelo.

- **Sistemas de baterías.** Sistema de alimentación electroquímico en el que la eficiencia del proceso vendrá marcada por la capacidad de almacenamiento del sistema de baterías. Puesto que la energía específica que se puede almacenar en la actualidad es baja, serían necesario un número elevado de baterías. Esto constituye un factor negativo a contemplar, puesto que a diferencia de los sistemas de propulsión convencionales, el peso de las baterías repercute de forma importante a lo largo de todo el vuelo. Particularizando en las baterías de iones de litio (Li-Ion), las más empleadas hoy en día,

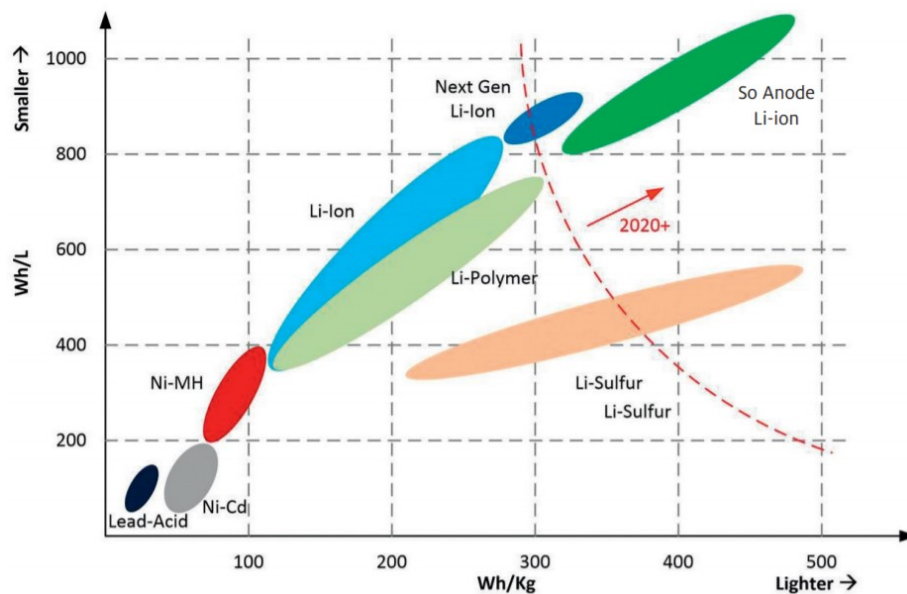


Figura 3.4 Sistemas de almacenamiento electroquímicos esperados en el futuro [17].

presentan una energía específica de aproximadamente 0.25 kWh/kg que supone un cuello de botella considerable, dado que limitan de forma evidente el alcance y posibilidades de estas aeronaves[34]. No obstante, el crecimiento esperado en el sector de las baterías es importante, y soluciones como las baterías de litio-azufre (Li-S), las baterías litio-oxígeno o las baterías de estado sólido deben permitir en el futuro que los vehículos eléctricos se sitúen como un medio de transporte útil y verdaderamente competitivo.

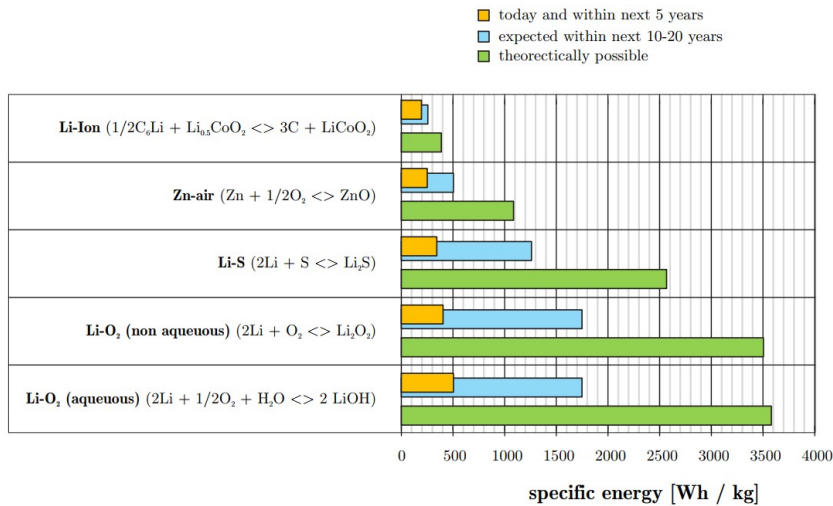


Figura 3.5 Energía específica esperada para los distintos tipos de baterías [34].

- Sistemas de pilas de combustible.** Basadas en una reacción electroquímica, las pilas de combustible pueden tomar la energía de diversas fuentes, destacando el metanol, el gas natural y especialmente el hidrógeno. La energía se genera a través de una reacción galvánica entre ánodo y cátodo. Este flujo entre ánodo y cátodo se produce a través de un electrolito de polímero y llega hasta el cátodo, donde se une con el oxígeno que se está inyectando desde el exterior. De este modo, generamos electricidad mediante una reacción química controlada. Actualmente se trata de una solución en la que hay puestas grandes

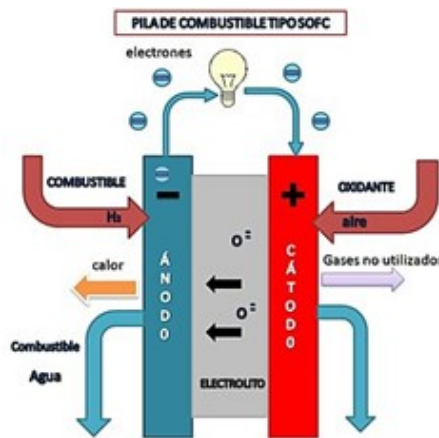


Figura 3.6 Esquema de una pila de combustible [35].

esperanzas, pero todavía no está disponible en el mercado. Estas virtudes se deben fundamentalmente a la elevada energía específica de estos combustibles. En particular, el hidrógeno puro tiene una energía específica de 33.3 kWh/kg [33], un valor muy superior a los sistemas de almacenamiento empleados en la actualidad.

Además, al igual que en los sistemas de combustible convencionales, el peso de combustible va disminuyendo durante el vuelo, y por tanto también el peso de la aeronave.

- Soluciones híbridas.** Dadas las limitaciones actuales de los sistemas de baterías, las soluciones híbridas suponen un factor que no debemos olvidar en el desarrollo a corto plazo de las aeronaves eVTOL. De este modo, se podría disponer baterías para el almacenamiento parcial de energía, apoyadas por sistemas de pilas de combustible o turbinas para la combustión de combustibles convencionales. Esto permitiría alcanzar una densidad de energía mayor, pero la eficiencia del conjunto y la adecuada integración son aspectos que deben ser estudiados en detalle.

- **Supercondensadores.** Se trata de fuentes secundarias de energía de respuesta rápida en situaciones transitorias, realmente útiles ante demandas pico de potencia muy grandes en un corto periodo de tiempo. Son, por tanto, un complemento a los sistemas de baterías. Presentan una carga y descarga mucho más rápidas que las baterías, y además el ciclo de vida es muy superior a estas últimas.

En la mayoría de modelos en desarrollo actualmente, las baterías de iones de litio son el sistema de almacenamiento de energía más empleado. Mientras otros sistemas y soluciones alternativas son implementados, está previsto que las baterías de iones de litio alcancen una energía específica superior a los 300 Wh/kg para 2025 [33]. Sin embargo, si lo comparamos con la energía específica de los combustibles convencionales, por ejemplo el queroseno Jet A1 [17], esto supone un valor aun 40 veces inferior.

A este hecho hay que sumar el factor ya comentado de que el sistema de baterías supone un peso adicional para nada despreciable en la aeronave. Las aeronaves con sistemas de baterías a bordo presentan una relación entre OEW y MTOW demasiado alta, lo que implica una baja carga de pago que limita las posibilidades. Nos encontramos, por tanto, ante un doble reto: por un lado, tratar de obtener una solución eléctrica que se acerque a los valores obtenidos mediante la conversión química de hidrocarburos como el queroseno o el gas propano, y por otro, el tratar de reducir al máximo posible la relación OEW-MTOW con vistas a conseguir aumentar la carga de pago de la aeronave, aunque ambos factores estarán estrechamente relacionados.

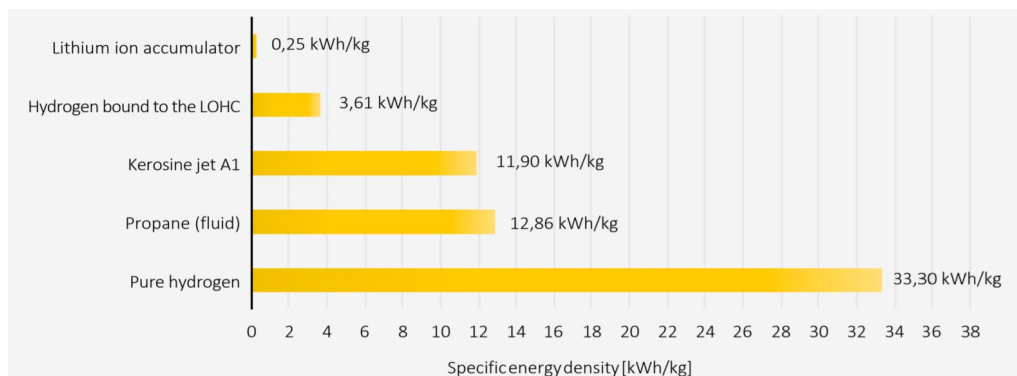


Figura 3.7 Energía específica de los distintos sistemas de almacenamiento [17].

### 3.3 Otros requisitos

Además de las características propias para el despegue y el aterrizaje vertical y un sistema de almacenamiento de energía en lo posible eléctrico, son muchos los requisitos que las aeronaves eVTOL deberían cumplir para sobrevolar los cielos en entornos urbanos. Estos no solo estarán ligados a la seguridad, sino también a la adecuada operación en tierra y a la aceptación social de los ciudadanos. Algunos de los aspectos a atender se recogen a continuación:

- **Seguridad.** De acuerdo con la SC-VTOL de EASA, una aeronave VTOL de categoría pequeña puede ser certificada en la categoría básica o en la categoría mejorada. En este caso, para aeronaves de un peso hasta 3175 kg que van a operar en entornos urbanos o van a ser empleadas para el transporte comercial se deberían certificar en la categoría mejorada. Esto es, el sistema de propulsión de la aeronave deberá ser diseñado teniendo en cuenta una probabilidad crítica de fallo de  $10^{-9}$  [31].

Sin embargo, el crecimiento esperado en el sector de la UAM y los eVTOL hará que medidas más exigentes a las de la aviación general sean llevadas a cabo.

- **Ruido.** Una de las desventajas más importantes de los helicópteros usados en entornos urbanos es la contaminación acústica que generan a su paso. Frente a los aproximadamente 95 dB que alcanzan

de pico los helicópteros en maniobras como el despegue, las aeronaves eVTOL serán diseñadas de forma que generen un ruido significativamente menor. Se estima que las aeronaves eVTOL en proceso de desarrollo no superaran los 70 dB a una distancia de 150 m [14], siendo perceptualmente más silenciosas y más agradables para el ciudadano. Este hecho se debe fundamentalmente a los siguientes factores [36]:

- Velocidad de punta reducida.
- Requiere un menor empuje en crucero.
- Se evita la interacción de vórtice de pala.
- Sistema de propulsión eléctrico.

Pese a que se trata de un aspecto de gran relevancia para mejorar la percepción ciudadana y evitar fenómenos adversos en la salud de los mismos, desde OACI aún no existen estándares de ruido específicos para RPAS y aeronaves eVTOL a emplear en la UAM.

- **Recarga.** La gran demanda esperada en los puntos de conexión en tierra de la red UAM hace que instalaciones de carga rápida deban ser dispuestas en la infraestructura terrestre. La carga rápida permite alcanzar un 80% o 90% del nivel de las baterías en cuestión de minutos gracias a sistemas de carga rápida que alcanzarán hasta 600 kW de potencia [37]. Las aeronaves, por tanto, deberán disponer de la interfaz que permita la conexión y carga adecuada.
- **Carga de pago.** Tal y como se ha comentado en el apartado 3.2, el hecho de llevar las baterías a bordo limita de forma considerable la carga de pago disponible. Siguiendo con el planteamiento de la SC-VTOL de EASA, hasta 9 pasajeros podrán ser transportados, lo que supone un peso total aproximado de 900 kg más el posible equipaje. Fabricantes como Joby Aviation, Terrafugia o Lillium están trabajando actualmente en modelos eVTOL de hasta 5 pasajeros, mientras que compañías como EHang o Volocopter prefieren optar por modelos más compactos, con únicamente 1 o 2 pasajeros.
- **Tamaño.** Además de tratar de maximizar la carga de transporte, también se debe poner en balanza las dimensiones de la aeronave. Un factor clave para la correcta operación será la infraestructura terrestre en núcleos densamente poblados, donde el espacio disponible es limitado, y por tanto una optimización del espacio disponible será fundamental. Esto también repercute en el tamaño de la aeronave, y de acuerdo con un primer estudio realizado por Uber Air la máxima dimensión en planta reservada para aeronaves no debería superar los 50 ft, lo que equivale a unos 16 m [38].
- **Comunicaciones.** La gran demanda esperada en ciudades hace indispensable la integración del tráfico aéreo no tripulado con la aviación comercial existente en la actualidad. Por ello, una interfaz fiable debe ser dispuesta de forma que se pueda transmitir y recibir información precisa acerca de la posición o el estado de las baterías. En este sentido, el papel de los sistemas de comunicación 5G será fundamental para vuelos de baja altitud como serán los de la UAM. El 5G permitirá la comunicación aeronave-aeronave y aeronave-tierra incluso en condiciones atmosféricas desfavorables gracias a su baja latencia y su gran ancho de banda [14], lo que sin duda permitirá establecer una ciudad cada vez más autónoma e inteligente.
- **Alcance.** Aunque las posibles aplicaciones y usos de estas aeronaves dentro del entorno UAM será muy variado, un alcance mínimo de 50 km debe ser indispensable para un desarrollo realmente rentable y que abarque todo el núcleo urbano. No obstante, aplicaciones relacionadas con los servicios de emergencia deberán llevarse a cabo con aeronaves que garanticen un alcance mayor, entre 80 y 150 km [17]. Por otro lado, si queremos garantizar un tiempo máximo de vuelo intraurbano de 15 minutos, un valor razonable y ya considerado por muchas compañías en el sector, se deberán alcanzar velocidades mínimas de 100 km/h.
- **Disponibilidad.** Las aeronaves eVTOL deben permitir la operación segura bajo condiciones climatológicas adversas y situaciones de baja visibilidad. Las condiciones críticas a baja altitud para esta aeronave son principalmente las grandes rachas de viento, las tormentas y las lluvias torrenciales. Por otro lado, está previsto que las aeronaves puedan operar tanto de día como de noche. Así, sistemas de visión

nocturna (NVIS) que amplifiquen la luz ambiente serán necesarios para garantizar las operaciones durante la noche, al igual que deben ser consideradas las Reglas Nocturnas de Vuelo Visual (NVFR) en las primeras etapas de crecimiento. Por otro lado, tecnologías basadas en la inteligencia artificial para la detección automática de obstáculos están siendo desarrolladas, ya sea para sistemas autónomos o pilotados a bordo.

## 3.4 Fabricantes

### 3.4.1 EHang 216

El fabricante chino EHang, fundado en el año 2014 en Guangzhou, está llamado a ser uno de los pioneros en el sector de la movilidad aérea eléctrica, urbana y autónoma. EHang diseñó el EHang 184 como un primer paso dentro de las aeronaves eVTOL. El EHang 184 estaba formado por 4 brazos y un total de 8 hélices, dando lugar a un multirroto con un único pasajero. Posteriormente, y ya con las bases sentadas tras el diseño del EHang 184, la firma china anunció en febrero de 2018 el EHang 216, una versión actualizada del anterior pero con un total de 8 brazos y 16 hélices, lo que permite ampliar la capacidad a 2 pasajeros. [41]

A diferencia de la mayoría de competidores, que en esta primera etapa de crecimiento están diseñando aeronaves eVTOL con piloto a bordo, EHang está centrando sus esfuerzos en el desarrollo de una aeronave completamente autónoma. En enero de 2020 la firma asiática informó de que ya se habían realizado más de 2000 pruebas de vuelo con pasajeros, bajo situaciones de viento de hasta 70 km/h y condiciones de baja visibilidad. Esto se corresponde con más de 15000 horas de vuelo que permitirán, según EHang, mejorar la aceptación social acerca de la UAM y las aeronaves autónomas [39]. En este sentido, en enero de 2021 se unió al proyecto AMU-LED, lo que permitirá al EHang 216 realizar vuelos de demostración en Países Bajos, Reino Unido y España.

El EHang 216 presenta un sistema de almacenamiento de 2 baterías, que le permiten llegar a un alcance máximo de 35 km y una velocidad de crucero máxima de 130 km/h. Cada una de las 16 hélices tiene su propio motor eléctrico independiente, garantizando la redundancia y seguridad en sus operaciones. Uno de los aspectos más limitantes actualmente es su autonomía, puesto que presenta un tiempo máximo de vuelo de 21 minutos. [41]

Además de la versión estándar, la compañía china también ha adaptado este modelo a aplicaciones específicas. El EHang 216 Logistics permite realizar tareas con fines de logística aérea, mientras que el EHang 216F permite transportar hasta 150 litros de espuma contra incendios y 6 bombas extintoras en un solo vuelo. Este hecho nos muestra que la UAM la debemos concebir como un nuevo modo de transporte multidisciplinar y completamente integrado a la red de transportes existentes, y no únicamente como un nuevo medio para el traslado comercial de pasajeros.



Figura 3.8 EHang 216 [41].



### 3.4.2 Volocopter VoloCity

La compañía alemana Volocopter fue la encargada de realizar en 2011 el primer vuelo eléctrico tripulado en multicoptero del mundo. Volocopter está focalizando su acción en proveer un servicio de taxi aéreo realmente sostenible dentro de la UAM. Con la fabricación del Volocopter VoloCity, un multicoptero con configuración multirrotor, la empresa germana está centrándose en la que, dada su simplicidad, podría ser una de las primeras aeronaves eVTOL en el mercado.

Volocopter trabaja de acuerdo a la Parte-21G de EASA y la categoría mejorada de la SC-VTOL, siendo el VoloCity el resultado de múltiples etapas de evolución. El Volocopter VoloCity está formado por un anillo superior con un total de 18 rotores, cada uno de los cuales opera de forma independiente. En esta primera etapa, dispondrá de un sistema de baterías intercambiables con un tiempo de cambio de 5 minutos. En cuanto al vuelo en crucero, presenta una velocidad máxima de 90 km/h, con un alcance esperado entre los 35 y los 65 km. Aunque en un futuro se espera que sea autónomo, la configuración es biplaza, con un piloto a bordo y un pasajero con su equipaje, teniendo una carga útil total de 200 kg. [42]



**Figura 3.9** Volocopter VoloCity [42].

### 3.4.3 Airbus CityAirbus

Airbus, y en particular su unidad UAM, está desempeñando un papel cada vez más importante a nivel mundial en el mercado de la UAM. Este interés no se limita únicamente al estudio de la tecnología eVTOL, sino que también se centra en la gestión del espacio aéreo, los marcos regulatorios del sector y la infraestructura terrestre necesaria. Así, Airbus considera que la UAM contribuirá de forma determinante para asentar un sistema de movilidad multimodal y cada vez más integrado, seguro y sostenible. Por lo que concierne a las aeronaves en las que trabaja, Airbus ha desarrollado dos modelos con características muy diferentes: el Airbus CityAirbus y el Airbus Vahana.

En particular, el Airbus CityAirbus, que realizó su primer vuelo en mayo de 2019, es un multirrotor con ventiladores canalizados pilotado de forma autónoma y con capacidad para 4 pasajeros. Está formado por 8 rotores y sus respectivos 8 motores eléctricos, cada uno de los cuales ofrece una potencia de 100 kW. Con un sistema de 4 baterías de 140 kW, presenta una autonomía de 15 minutos y una velocidad de crucero de 120 km/h, y permitiendo una carga útil de hasta 250 kg. Está previsto que obtenga el certificado de tipo y entre en el mercado en el año 2023.[43]



**Figura 3.10** Airbus CityAirbus [42].

**Tabla 3.1** Características modelos eVTOL (configuración multirrotor) [41] [42] [43].

Modelo	EHang 216	Volocopter VoloCity	Airbus CityAirbus
Tipo	Multirrotor	Multirrotor	Multirrotor
Propulsión	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Alcance	35 km	35-65 km	100 km
Autonomía	21 min	-	15 min
Velocidad crucero	100 km/h	90 km/h	120 km/h
Carga de pago	220 kg	200 kg	250 kg
Pasajeros	2	2	4
Pilotaje	Autónomo	Pilotado/Autónomo	Autónomo

#### 3.4.4 Wisk (Kitty Hawk) Cora

La compañía americana Wisk surgió a finales de 2019 fruto de la acción conjunta entre Boeing y Kitty Hawk, aunque esta última ya había presentado el Cora en marzo de 2018 como una aeronave biplaza derivada del Zee Aero Z-P2. Se trata de una aeronave eVTOL autónoma formada por 12 hélices independientes de propulsión eléctrica para la elevación y una hélice con eje horizontal que proporciona el empuje necesario durante el crucero, dando lugar al concepto de elevación más crucero que se vió en el apartado 3.1.

El Wisk Cora tiene una autonomía de 19 minutos y un alcance de 100 km. En cuanto al vuelo en crucero, presenta una velocidad máxima de 180 km/h y puede operar a una altura de hasta 3000 pies sobre el suelo.[44]

En noviembre de 2020 Wisk entró a formar parte de la Campaña Nacional de Movilidad Aérea Avanzada (AAM) de la NASA con el fin de continuar con el desarrollo y estandarización de la AAM, y en marzo de 2021 Boeing informó de la fusión entre Wisk y Aurora Flight Sciences para combinar los conocimientos de ambas compañías dentro de las aeronaves eVTOL, lo que pone de manifiesto el crecimiento de la marca y su papel cada vez más relevante en el sector.

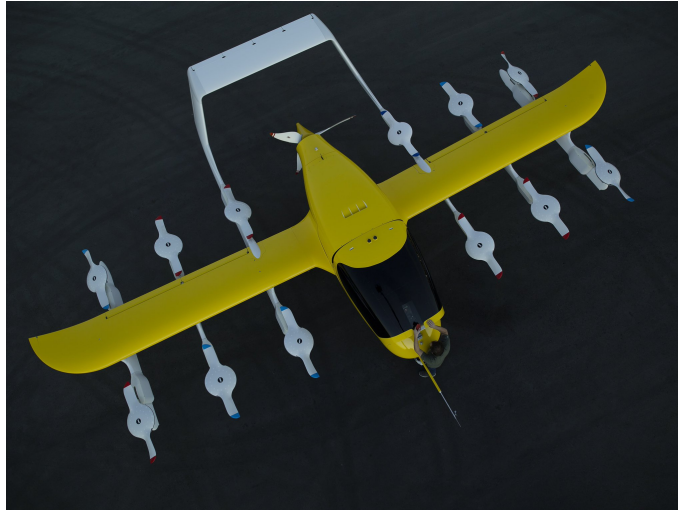


Figura 3.11 Wisk Cora[44].

### 3.4.5 Lilium Jet

Lilium es una empresa alemana fundada en 2015, que pese a su corta historia ha pasado a ser uno de los referentes europeos dentro de la UAM. En mayo de 2019 Lilium anunció el primer vuelo de su aeronave eléctrica de 5 plazas, el Lilium Jet. Este prototipo, formado por un total de 36 propulsores eléctricos canalizados que reducen el ruido, está considerado como la primera aeronave eVTOL con 5 pasajeros del mundo, y aunque actualmente opera de forma pilotada, está previsto que sea completamente autónoma.[46]

La integración de los motores en las alas permite un aumento de la eficiencia, y cada uno de estos motores trabaja de forma independiente, por lo que el fallo de uno no repercute en el funcionamiento de los adyacentes. Durante la primera fase de prueba del Lilium Jet se alcanzaron velocidades superiores a 100 km/h, aunque está previsto que pueda alcanzar una velocidad de crucero de 300 km/h. Además, se espera que pueda tener una autonomía de 60 minutos, con un alcance máximo de 300 km, por lo que no solo permitirá la movilidad urbana, sino también regional. El Lilium Jet emplea el mismo tipo de baterías de iones de litio que un coche Tesla, lo que permite consumir hasta el 90 % energía en comparación con otros modelos.

La aeronave está siendo certificada dentro de la categoría de ala fija, y se espera que pueda ser comercializada en 2025. Asimismo, Lilium trabaja en la ampliación de su Lilium Jet, y así lo demuestra su fusión con Qell Acquisition, con la que pretende desarrollar una aeronave eléctrica de 7 plazas.[45]



Figura 3.12 Lilium Jet [45].

### 3.4.6 Joby S4

La empresa aeroespacial Joby Aviation fue fundada en 2009 por el ingeniero Joe Ben Bevirt, y actualmente tiene sede en Santa Cruz y San Carlos, California (EE. UU.). Desde sus comienzos se ha centrado en el diseño de aeronaves eVTOL adaptables al entorno urbano y la sociedad que lo rodea, siendo sus primeros proyectos el Joby S2, el Joby Lotus y el Joby Monarch. Pero sin duda, el modelo más conocido de la compañía americana es el Joby S4, derivado del Joby S2.

El modelo Joby S4 fue presentado en enero de 2019 en el 2º Taller Anual de Vuelo Vertical Transformativo AHS, aunque hasta enero de 2020 no se mostraron las características iniciales y los resultados de los vuelos de prueba. Se trata de una aeronave de 5 asientos, inicialmente pilotada a bordo, y con empuje vectorial a través de 6 hélices basculantes, 4 de ellas en alas fijas y las otras 2 en una cola en “V”. Presenta un tren de aterrizaje retráctil de tipo triciclo, lo que le permite la operación de taxi en tierra, y según la marca es hasta 100 veces más silencioso que los helicópteros convencionales.[47]

El sistema de propulsión distribuida, además de reducir el ruido, permite que se puedan alcanzar velocidades de hasta 322 km/h, con un alcance de 241 km/h. Aunque inicialmente es pilotado a bordo, se espera que en un futuro sea autónomo, y muestra de ello es un avanzado sistema de control de vuelo que reduce al mínimo la carga sobre el piloto, especialmente en la maniobra de conversión de elevación hasta vuelo horizontal. En lo referente al sistema de almacenamiento, está formado por un vanguardista sistema de baterías de litio-níquel-cobalto-óxido de manganeso.[47]

En diciembre de 2020 Joby Aviation adquirió la división Uber Elevate, la que hasta ahora había tenido un papel fundamental en el desarrollo de la tecnología eVTOL y la adaptación y regulación de la UAM.



Figura 3.13 Joby S4 [47].

Tabla 3.2 Características modelos eVTOL (resto) [44] [45] [46] [47].

Modelo	Wisk Cora	Lilium Jet	Joby S4
Tipo	Ascensión+crucero	Empuje vectorial	Empuje vectorial
Propulsión	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Alcance	100 km	300 km	241.4 km
Autonomía	19 min	60 min	-
Velocidad crucero	180 km/h	300 km/h	322 km/h
Carga de pago	181 kg	500 kg	-
Pasajeros	2	5	5
Pilotaje	Autónomo	Pilotado/Autónomo	Pilotado/Autónomo

## 4 Infraestructura

---

El elemento más determinante para el éxito de la UAM y su integración dentro de las ciudades será la infraestructura terrestre dispuesta para el despegue y aterrizaje de las aeronaves eVTOL, también conocida como vertipuertos. No solo por el hecho de permitir una operación segura de las aeronaves, sino también por el hecho de conseguir un sistema de transporte realmente accesible para todos los ciudadanos. En cambio, mientras los avances en las aeronaves son cada vez mayores, los estándares asociados a la infraestructura terrestre no están claramente definidos, lo que constituye una de las principales limitaciones de la UAM. Así pues, podríamos definir un vertipuerto como el espacio destinado al despegue y aterrizaje de aeronaves de tipo VTOL, además de todas las instalaciones necesarias para la correcta operación de estos vehículos y el control del flujo de pasajeros usuarios de los mismos. Nos encontramos, por tanto, ante un nuevo concepto de aeródromo que, por dimensiones, puede tener similitudes con los helipuertos convencionales, pero si atendemos a la demanda de pasajeros prevista y al flujo de operaciones, el parentesco podría ser mayor con el concepto de aeropuerto tal y como lo conocemos hoy en día.

La primera idea que nos podríamos plantear sería la de tratar de utilizar la infraestructura existente, en concreto los helipuertos presentes en zonas próximas a núcleos urbanos, para comenzar a adaptar las ciudades a los requerimientos de la UAM. Sin embargo, no podemos perder de vista que los avances de ingeniería hacen de las aeronaves eVTOL un concepto diferente de medio de transporte, y como tal, los vertipuertos deben cumplir con las exigencias y las características propias de estas aeronaves. Por ejemplo, la propulsión híbrida o eléctrica como punto central de la UAM hará necesario el desarrollo de una instalación de carga y almacenamiento de baterías realmente efectiva, con un sistema de control de baterías inteligente que se encargue de la monitorización continua de las mismas. Por tanto, la utilización de la infraestructura ya existente puede ser francamente útil en la primera etapa de la UAM, donde muchas aeronaves emplearán sistemas híbridos y por tanto el queroseno seguirá siendo considerado, pero parece claro que si nos fijamos en etapas más lejanas de la UAM, vertipuertos estratégicamente ubicados y adaptados a las exigencias de las aeronaves eVTOL deben ser desarrolladas.

Además de la notable reducción de la congestión y contaminación atmosférica existente en la actualidad, el desarrollo de una red urbana para eVTOL permitirá situaciones favorables en términos de coste con respecto a otras infraestructura como podrían ser carreteras, puentes o sistemas ferroviarios. De hecho, se estima que la flexibilidad y las ventajas que ofrecen las aeronaves eVTOL supondrán en términos globales una reducción superior 50% con respecto del coste en infraestructura urbana hoy en día. [48]

Dentro del crecimiento esperado, una ciudad deberá disponer de múltiples sitios para el despegue y aterrizaje de aeronaves y para la recarga eléctrica, por lo que hay que entender la infraestructura terrestre asociada a la UAM como una red de vertipuertos cuidadosamente dispuestos y con diferente función dentro del mapa urbano. La posición dentro de la red, la aplicación a desarrollar en cada vertipuerto y la demanda prevista darán lugar a vertipuertos de diferente forma, tamaño, y función, que entendidos de forma global permitirán conectar cualquier punto de la ciudad a través de una tercera dimensión.

Pero la creación de una infraestructura específica tiene aparejados importantes retos que deben contemplados. Por un lado, el limitado espacio en centros urbanos, unido al alto precio de adquisición del terreno hace que debamos pensar en una infraestructura optimizada y lo más compacta posible, estudiando diferentes configu-

raciones de aterrizaje posibles y teniendo en cuenta al mismo tiempo los aspectos normativos adecuados para garantizar la seguridad operacional en todo el vertipuerto.

Por otro lado, el impacto visual y acústico en comunidades vecinas será también de relevante importancia en el crecimiento de la red. La aceptación social es el punto central para la adecuada integración de los vertipuertos en ciudades, y por ello unido a los factores anteriores se debe hacer un cauteloso estudio de las condiciones que rodean a cada ciudad y los puntos de la misma donde los vertipuertos conseguirían el máximo beneficio para la población.

Sin embargo, paralelamente al análisis de las necesidades de la infraestructura y los condicionantes que conlleva, las aeronaves eVTOL deben ser certificables y cumplir con unos estándares de seguridad y robustez que permitan operaciones en las diferentes situaciones. El factor operacional de estos vehículos tendrá un papel fundamental en el diseño de los vertipuertos, y aunque en un primer momento serán pilotados, un sistema de gestión del tráfico aéreo no tripulado y un sistema de comunicaciones de alta velocidad deben ser tenidos en cuenta, algo que indiscutiblemente también repercutirá en el diseño de los vertipuertos. No cabe duda que el objetivo final de la movilidad aérea urbana es la integración total de aeronaves completamente autónomas en el espacio aéreo tal y como lo conocemos a día de hoy, pero este fin lleva asociados un conjunto de etapas intermedias que deben realizarse de forma progresiva. La misión de las autoridades reguladoras es conseguir la coexistencia de aeronaves tripuladas y no tripuladas de una forma eficaz y robusta, algo para lo que ya se están dando los primeros pasos. El U-Space, impulsado por la Comisión Europea y aprobado por el comité de EASA el pasado 24 de febrero permitirá respaldar un acceso seguro y eficiente al espacio aéreo de grandes cantidades de drones [49]. Se trata por tanto, de una primera fase evolutiva sobre la que seguir trabajando para introducir una movilidad segura, sostenible y conectada en entornos urbanos.

En cualquier caso, pese a las barreras actuales en términos legislativos y tecnológicos, la creación de las primeras redes de vertipuertos en entornos urbanos es visto como una gran oportunidad de mercado para las empresas desarrolladoras de infraestructura, que ya han comenzado sus gestiones para liderar este nuevo y revolucionario proceso.

## **4.1 Contenido**

Las características propias de cada instalación vendrán marcadas por la aplicación concreta que vaya a desarrollarse en la misma y, sobre todo, por la demanda esperada y el número de operaciones que se vayan a llevar a cabo. Como norma general, un vertipuerto deberá tener los siguientes contenidos mínimos.

### **4.1.1 Zona de despegue**

El punto central de todo vertipuerto será el área destinada al despegue y aterrizaje de las aeronaves eVTOL. Las pautas para el diseño de la zona de despegue en las primeras etapas de crecimiento de este nuevo concepto de infraestructura serán en gran medida las que ya conocemos para helipuertos, y en efecto la dimensión crítica de la aeronave será uno de los factores fundamentales a considerar, sin embargo aspectos adicionales propios de las aeronaves eVTOL deben ser examinados.

Por otro lado, la congestión urbana y el objetivo de introducir la movilidad aérea como un medio más de transporte hará que múltiples zonas de despegue en un mismo vertipuerto deban ser diseñadas, por lo que la configuración elegida para optimizar la superficie existente garantizando los estándares de seguridad deberá ser un punto básico en el análisis de cada zona de despegue. Existen estudios que muestran que para que un vertipuerto destinado al transporte de pasajeros mediante taxi aéreo sea rentable, al menos 3 zonas de despegue deberían definirse. Todo ello, por supuesto, vendrá determinado por el estudio de demanda y las condiciones que queramos imponer en nuestra infraestructura.

Del mismo modo, las trayectorias para la aproximación y despegue de las aeronaves también serán de relevancia a la hora de diseñar la zona de despegue, puesto que en entornos urbanos los posibles obstáculos presentes pueden ser un factor limitante.

A su vez, dentro de cada zona de despegue podemos distinguir los siguientes elementos:

- **Área de aproximación final y despegue (FATO).** Área definida en la que termina la fase final de la maniobra de aproximación hasta el vuelo estacionario o el aterrizaje y a partir de la cual empieza la maniobra de despegue. La FATO estará despejada de obstáculos, por lo que cualquier sistema del vertipuerto que pudiese influir en las maniobras de despegue o aterrizaje de las aeronaves debería ser retirado. [50]
- **Zona de toma de contacto y elevación inicial (TLOF).** Área que permite la toma de contacto o la elevación inicial de las aeronaves [50].
- **Área de seguridad (SA).** Área definida en torno a la FATO, que está despejada de obstáculos, salvo los que sean necesarios para la navegación aérea y destinada a reducir el riesgo de daños de las aeronaves que accidentalmente se desvíen de la FATO [50].

#### 4.1.2 Área de rodaje

Trayectoria definida para el movimiento de las aeronaves entre los distintos puntos del vertipuerto. Algunos modelos eVTOL en desarrollo incluyen un tren retráctil que le permite realizar la maniobra de rodaje en tierra, aunque la mayoría se trasladarán por aire usando sus propios medios propulsivos. Distinguiremos, por tanto, entre calle de rodaje en tierra o aérea.

#### 4.1.3 Zona de estacionamiento

Puestos reservados para el estacionamiento de las aeronaves y donde terminan las operaciones de rodaje en tierra o realiza la toma de contacto y se eleva para operaciones de rodaje aéreo. Deben estar situados de forma que garanticen la seguridad operacional entre aeronaves y permitan el embarque y desembarque de pasajeros a la aeronave de una forma ordenada y segura. Del mismo modo, en esta zona se preparará la aeronave para el siguiente vuelo, realizando el mantenimiento necesario, incluyendo la recarga o intercambio de baterías.

Al igual que el número de zonas de despegue, la cantidad de puestos de estacionamiento vendrá determinada por la demanda de operaciones que se pretende satisfacer. Las dimensiones de los mismos deben garantizar la correcta operación de las aeronaves y cumplir con los estándares de seguridad necesarios, a la vez que deben maximizar la eficiencia, dado el reducido espacio disponible en la mayoría de casos para la construcción de los vertipuertos.

Adicionalmente, el vertipuerto deberá disponer de una zona de mantenimiento y reparación para las aeronaves a las que da servicio, de forma que también tenga una función de estacionamiento en su interior. De este modo, además de las labores de mantenimiento rutinarias llevada a cabo en los puestos de estacionamiento hasta ahora definidos, estaría disponible un servicio de puesta a punto más prolongado para aquellas aeronaves que requieran un tratamiento específico previo al vuelo, teniendo una misión de estacionamiento al uso cuando todas las aeronaves se encuentran en perfecto estado, y permitiendo así optimizar el funcionamiento del vertipuerto.

#### 4.1.4 Instalación de recarga

Una de las mayores ventajas que ofrecen estas aeronaves sobre los medios de transporte convencionales es su reducida contribución a las emisiones de efecto invernadero. En este sentido, es esperable que sea un medio completamente eléctrico, y como tal, debe tener una infraestructura asociada capaz de soportar las grandes cantidades de energía que requiere.

Tal y como vimos en el apartado 3.2, son varios los sistemas de almacenamiento posibles en los que se está investigando en el sector, siendo los más factibles a corto plazo los sistemas híbridos como punto de transición que combina combustión y baterías, o los sistemas de baterías puros, que proporcionan una propulsión completamente eléctrica. Por tanto, partimos de la base que dado el elevado número de operaciones previsto en los vertipuertos, las condiciones en términos de recarga baterías serán muy exigentes. Por ello, no

solo se debe tener en cuenta una infraestructura de recarga, sino también un sistema inteligente de gestión de baterías realmente eficiente y operativo en todo momento. Dependiendo de las características de la instalación y el uso para el que ha sido diseñado, la recarga de baterías podrá ser realizada:

- En el puesto de estacionamiento. La estación de recarga estaría directamente en el puesto de estacionamiento de cada aeronave. Esto permitiría no tener que realizar el cambio de baterías y simplificaría el sistema de gestión de almacenamiento, pero por el contrario habría que esperar a que la aeronave se recargara “in situ”, ocupando espacio en el vertipuerto y aumentando el tiempo de espera. Es la solución que propone en primera instancia Lilium para su Lilium Jet [51].
- En una instalación específica separada para la recarga de baterías. Las baterías de la aeronave serían intercambiables, de forma que después de cada aterrizaje exista una batería completamente cargada para su inmediato intercambio. Este hecho permitiría ahorrar tiempo y aumentaría la funcionalidad del vertipuerto, pero requiere un sistema de gestión de baterías más complejo. Es la solución que propone Volocopter para sus modelos, estableciendo un tiempo mínimo de intercambio de baterías de 5 minutos para el Volocopter VoloCity, por ejemplo. [52]

Aunque la carga rápida degrada prematuramente las baterías debido principalmente al calor, existen estudios que muestran que la diferencia real con una carga lenta es mínima [53] en comparación con las ventajas que ofrece. Por tanto, siempre que sea posible deberemos garantizar la carga más suave posible, pero en situaciones de gran demanda la carga rápida será una buena opción.

Teniendo en cuenta estos términos, se deben considerar varios factores [17]:

- El servicio que la aeronave va a realizar durante el vuelo. Se debe disponer información continua acerca de las características operativas y de servicio de cada aeronave y vuelo, de forma que se optimice el funcionamiento del vertipuerto y se tengan en cuenta de situaciones prioritarias o de emergencia.
- La hora del día. La demanda de operaciones será considerablemente mayor durante el día que durante la noche, algo que repercutirá igualmente en la recarga de baterías. De este modo, mediante sistemas de inteligencia artificial se podría tener en cuenta este factor durante los ciclos de carga para maximizar la vida de las baterías.
- La condición de las baterías. Una batería que es retirada de la aeronave tras la operación debe ser enfriada antes de poder ser cargada de nuevo. Por tanto, el mantenimiento en tierra de las baterías deberá ser controlado en todo momento.

Por otro lado, el gran número de operaciones en las ya comentadas horas pico del día, unido a la alta potencia requerida para la carga rápida de las baterías nos obligará a tener en cuenta consideraciones adicionales en el desarrollo de la infraestructura. En primer lugar, repercute en la ubicación elegida para el vertipuerto, puesto que la integración de la infraestructura dentro de la red eléctrica debe ser adecuada y confiable en las situaciones de máxima demanda. En segundo lugar, se deben diseñar los equipos de enfriamiento y protección de las personas y el medio con respecto al alto voltaje requerido. Y en tercer lugar, un adecuado equipamiento contra el fuego es fundamental para evitar cualquier condición insegura relativa al uso y recarga de baterías, por lo que en la medida de lo posible, la instalación específica para la recarga de batería debería estar alejada de zonas como la terminal de pasajeros o hangares existentes.

El sistema de gestión de las baterías deberá estar diseñado atendiendo al uso y las condiciones previstas del vertipuerto, de forma que tenga en cuenta las características de las aeronaves que en él operan, el tipo de vuelo y los sistemas de carga disponibles, de forma que mediante algoritmos sea capaz de controlar la recarga de baterías de toda la instalación. El sistema de gestión permitirá [17]:

- Adaptación inteligente a los servicios de carga
- Mantenimiento y monitorización del estado de baterías
- Capacidad de enfriamiento y almacenamiento

Actualmente, se estima que los sistemas de baterías de las aeronaves eVTOL en desarrollo pueden ser recargados a 350 kW, si bien se trata de un límite superior. Por tanto, si queremos garantizar que nuestro vertipuerto sea operable para todo tipo de aeronaves, debería proveer una potencia superior a 350 kW en corriente



continua para la carga rápida en cada puesto de estacionamiento o recarga. Del mismo modo, adicionalmente se deberían considerar valores de carga en torno a un 10% superiores debido a las pérdidas de eficiencia.

#### 4.1.5 Terminal

Aunque la aplicación concreta de cada vertipuerto marcará la infraestructura no aeronáutica requerida, si nos centramos un ámbito más comercial, una zona de tratamiento y atención al pasajero es indispensable. El objetivo fundamental de la terminal será permitir la correcta transferencia de pasajeros de forma eficiente y segura, tratando de garantizar una experiencia fluida y reducir el tiempo de espera.

Por contra, pese a la tendencia aeroportuaria de favorecer a concesionarios y actividades comerciales, no debemos perder de vista que dentro del contexto de la UAM, debemos concebir las aeronaves eVTOL como un medio de transporte urbano más, como podría ser el autobús o el taxi. Así, el tiempo que pasa el pasajero en la terminal podría ser semejante al que pasa en una estación de tren o de autobús y por tanto, el diseño estará más centrado en ahorrar el máximo tiempo posible a los usuarios del vertipuerto y conseguir una funcionalidad óptima.

Si atendemos a la estructuración básica de la terminal, es esperable que se reduzcan el número de módulos con objeto de facilitar el control y de procesamiento de pasajeros, a la vez que exista un acceso seguro con los puestos de estacionamiento de aeronaves.

## 4.2 Contextualización en el entorno urbano

El diseño y la construcción de la infraestructura terrestre para el despegue y aterrizaje de las aeronaves eVTOL tendrá gran relación con las características propias de cada ciudad donde va a ser ubicado. Esto, unido a la utilidad que se le pretende dar al mismo y el público que pretende satisfacer, nos dará lugar a infraestructuras con características muy diferentes y variadas. De forma genérica, podemos clasificar esta infraestructura atendiendo a la demanda prevista y el volumen de operaciones que acoge del siguiente modo [54]:

- **Vertihub.** Infraestructura destinada a soportar un alto volumen de operaciones, por lo que debido a sus grandes dimensiones se situará en zonas periféricas de la ciudad. El vertihub, como nodo más importante de la red, no solo acogerá operaciones intraurbanas de poca distancia, sino que será el punto de llegada y salida de vuelos interurbanos con una distancia mayor. A su vez, debe tener instalaciones específicas para controlar el flujo de pasajeros y carga que recibe, con el personal de apoyo adecuado, así como hangares y zonas de mantenimiento para las aeronaves. Generalmente, estará formado por los siguientes elementos:
  - Múltiples FATO
  - Múltiples puestos de estacionamiento
  - Hangares y servicios de mantenimiento
  - Zona de recarga y almacenamiento de baterías
  - Terminal de pasajeros
  - Oficinas
  - Alojamiento para tripulaciones y otros servicios
  - Aparcamientos
- **Vertipuerto.** Aeródromo situado idealmente en las zonas centrales y los puntos de mayor demanda de la ciudad, teniendo en cuenta las limitaciones de espacio y los obstáculos cercanos, por lo que requieren de un análisis de viabilidad más complejo. Lugares como centros de negocios, centros comerciales o estaciones de otros modos de transporte serán puntos a considerar dentro de la red de vertipuertos. Deberán hacer frente a un alto número de operaciones, especialmente en las horas pico del día, pero el volumen total esperado es menor que en los vertihub. Deberán incluir:

- Varias FATO
  - Múltiples puestos de estacionamiento
  - Sistemas de carga rápida
  - Terminal de pasajeros
- **Vertistop.** Se trata del elemento más simple de la red, destinado a la operación de un único vehículo y, por tanto, estará formado por una sola FATO. Las aeronaves dejarán y tomarán pasajeros sin necesidad de estacionar, por lo que no necesita instalaciones de soporte adicionales ni tiene excesivos requisitos constructivos. Así, la reutilización de la infraestructura existente es una de las mayores ventajas que presenta.

A su vez, los requisitos que debe cumplir cada vertipuerto vendrán determinados según su ubicación en el entorno urbano. Una de las rutas más interesantes que ofrece la movilidad aérea urbana es aquella que permite la conexión intermodal. De hecho, de acuerdo con el desarrollador de infraestructuras Skyports [48] los aeropuertos serán puntos clave dentro de la red de vertipuertos urbana, por lo que cabe pensar que en el corto plazo corredores aéreos desde el centro de la ciudad hasta el aeropuerto sean trayectos pioneros dentro de la red. Incluso los propios aeropuertos ven esta situación como una gran posibilidad para su integración en la ciudad, permitiendo reducir tiempo y evitar cuellos de botella en los accesos.

Por otra parte, las ya comentadas limitaciones en términos de espacio y alto coste en espacios urbanos llevan a considerar diseños alternativos a los vertipuertos en superficie. Infraestructuras en parkings, áreas residenciales, estaciones de tren o autobús serán cada vez más comunes. Incluso en los tejados de nuestros propios edificios podremos disponer de un acceso a la UAM, y es que si nos paramos a pensar la mayoría de azoteas de las actuales construcciones urbanas no son empleadas. Atendiendo a las características del medio sobre el que queremos edificar, podemos distinguir entre 3 tipos de vertipuerto:

- **En superficie.** Situado sobre la superficie terrestre, presenta una mayor sencillez constructiva y permite una mejor acceso para los usuarios. Constituirá la solución más adecuada en aquellas zonas donde el terreno disponible no suponga una limitación.
- **Elevado.** Cuando en el entorno urbano la construcción de un vertipuerto en superficie no sea posible, la única opción será su adaptación a la infraestructura terrestre ya existente. El hecho de disponer de un vertipuerto elevado tiene ventajas desde un punto de vista de las restricciones impuestas para las operaciones de las aeronaves, puesto que de forma general estará rodeado de zonas libres de obstáculos. Por otro lado, la accesibilidad para usuarios será mucho más limitada.
- **En plataforma.** Por motivos geográficos, pueden darse situaciones que lleven a la adaptación de esta infraestructura al entorno acuático mediante una vertiplataforma. Adecuado para aplicaciones de vigilancia costera y marítima mediante aeronaves eVTOL, aunque atendiendo al concepto de movilidad aérea urbana y sus implicaciones, quedaría fuera de este estudio.

### 4.3 Normativa aplicable

Además de los avances tecnológicos y soluciones de ingeniería en aeronaves e infraestructura, lo cierto es que las regulaciones y estándares del sector deben adaptarse a un ritmo frenético para permitir el desarrollo de la UAM. A lo largo del trabajo ya se ha comentado la posición de EASA para establecer el marco normativo con respecto a las aeronaves eVTOL y su integración en el espacio aéreo, sin embargo a menudo se tiende a olvidar un elemento fundamental para que este proceso pueda llevarse a cabo: la infraestructura terrestre.

Tanto las instituciones reguladoras nacionales como las internacionales son conscientes de este problema y actualmente se encuentran en un proceso de estudio y desarrollo de una normativa específica para vertipuertos. Para ello, es fundamental partir de las características de estos vehículos y fruto de ello es que tanto fabricantes como desarrolladores de infraestructura están teniendo un papel activo a lo largo de este proceso. EASA ha desarrollado específicamente un grupo de trabajo de vertipuertos (VTF) dentro del marco de creación de reglas 0230 con el fin de desarrollar el Manual de diseño de Vertipuertos, que servirá a los

Estados Miembros como orientación para la aprobación del diseño de vertipuertos. La EASA está empleando el Volumen II del Anexo 14 de OACI como base de este nuevo documento, alejándose del mismo en los puntos en los que las aeronaves eVTOL presentan novedades constructivas [55]. Es evidente que la exigencia de estos vehículos son otras, no solo en términos propulsivos, de performance o dimensiones, sino también en cuanto a la interfaz de comunicaciones que rodean a la operación de las aeronaves. Por ello, aunque se esté tomando de apoyo una normativa heliportuaria, el Manual de diseño de Vertipuertos deberá contener elementos propios y adaptados a este nuevo concepto de aeródromo. Del mismo modo, la FAA está llevando a cabo un proceso similar para la regulación del diseño de vertipuertos a través de su Centro Técnico [56]. Siguiendo esta tendencia, una armonización a nivel internacional para el desarrollo de esta infraestructura en las primeras etapas de la UAM lograría una estandarización realmente efectiva y que permitiría acelerar el ritmo de introducción al público.

Otros organismos internacionales se encuentran también en un proceso de creación de estándares que sirvan en un primer momento para el diseño y construcción de vertipuertos. EUROCAE (European Organization for Civil Aviation Equipment), por ejemplo, está trabajando en el desarrollo de la infraestructura de carga para estas aeronaves eléctricas y los servicios, instalaciones y procesos operativos que requieren los vertipuertos a través del grupo de trabajo 112 VTOL SG5 Ground [57]. Del mismo modo, ASTM Internacional (American Society for Testing and Materials) está centrándose en la creación de una nueva especificación para el diseño de vertipuertos mediante el Comité F38, encargado de los sistemas de aeronaves no tripuladas [58].

En cualquier caso, los avances dentro del sector de la UAM son continuos, y la infraestructura terrestre asociada debe estar preparada para que las aeronaves operen correctamente. Por ello, en estos momentos tanto los desarrolladores de infraestructura como los organismos reguladores se están basando en las regulaciones existentes sobre helipuertos para acelerar la introducción de los vertipuertos. El ya comentado Volumen II del Anexo 14 de OACI y la AC150/5300-13B de la FAA son los puntos de partida sobre los que se está trabajando. Sin embargo, como hemos visto a lo largo del trabajo, en la adaptación de estas regulaciones para el diseño de vertipuertos aparecen problemas asociados a la recarga de los vehículos eléctricos o el tipo de performance que desarrollan estas aeronaves. Por tanto, todavía queda por establecer una base normativa acerca de aspectos fundamentales para las aeronaves eVTOL como sería la recarga eléctrica o la lucha contra incendios en baterías.

En España, la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos se rige con respecto al ITC BT-52, donde ya se autoriza la instalación de supercargadores Tesla que ofrecen una carga ultra rápida de más de 100 kW de potencia. Sin embargo, actualmente nos encontramos en una etapa de crecimiento tecnológico con respecto a las baterías y las aeronaves eVTOL, un aspecto que obligará a una adaptación reglamentaria dadas las altas exigencias de potencia en las situaciones de carga rápida de estos vehículos. Por tanto, la normativa sobre los vertipuertos también deberá abarcar contenidos propios acerca de las instalaciones asociadas a mantenimiento y recarga de baterías.

## 4.4 Proyectos en desarrollo

Es indudable que la UAM se está convirtiendo en una revolución cada vez más realista dentro de la aviación y el transporte en general. El impulso de un medio de transporte sostenible, silencioso, que consiga descongestionar los centros urbanos de las grandes ciudades y a la vez permita ahorrar el tiempo de la población de manera considerable es notable, y aunque es evidente que la situación de recesión económica que vivimos actualmente a causa de la pandemia repercutirá en los plazos establecidos dentro de la UAM, las inversiones en este incipiente sector continúan debido a las altas posibilidades que ofrece y el “bajo riesgo” que supone. Así, en el primer semestre de 2020 la inversión en proyectos relacionados sector alcanzó los 907 millones de dólares [60], cifra 20 veces superior a las de 2016.

Tanto empresas tecnológicas, fabricantes de aeronaves eVTOL y desarrolladores de infraestructura, como gobiernos y reguladores están trabajando en una dirección común que permita crear las bases de mercado de la UAM, pero no debemos perder de vista que gran parte del éxito del sector vendrá marcado por la aceptación de la población ante este nuevo concepto de transporte. Por ello, a pesar de que como hemos visto en el apartado 4.3 no existe una regulación definida al respecto, cada vez son más las empresas que tratan de

acercar la UAM a la sociedad a través del elemento clave para la unión de ambos: los vertipuertos. A continuación se muestran algunos de los proyectos en desarrollo que marcarán la tendencia de la infraestructura terrestre necesaria para la operación de las aeronaves eVTOL.

#### 4.4.1 VoloPort (Volocopter/Skyports)

Fruto de la colaboración entre el fabricante alemán de aeronaves eVTOL Volocopter y la empresa británica Skyports, uno de los desarrolladores de infraestructura más activos en el sector. El VoloPort fue presentado el 21 de octubre de 2019 en el Congreso Mundial de Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) celebrado en Singapur como “la primera estación de taxis voladores del mundo”, aunque posteriormente fue desmantelado para su reutilización en futuras pruebas [59]. El proyecto se desarrolló para la operación del Volocopter 2X, aunque actualmente el diseño se centra en el producto estrella de la marca germana, el Volocopter VoloCity.

Se trata de una infraestructura flexible y modular, adaptable a cualquier zona del entorno urbano y en un primer diseño contó con una única plataforma para el despegue y aterrizaje de las aeronaves, aunque se espera que la superficie destinada a la operación de las aeronaves en aplicaciones comerciales sea mayor. Del mismo modo, el VoloPort tiene en cuenta factores adicionales para mejorar la estancia del pasajero, compaginando un diseño avanzado y sencillos procedimientos de embarque con las medidas de seguridad que una infraestructura aeronáutica como esta requiere.

Sin embargo, esto no supone un hecho excepcional, puesto que ambas empresas conciben el VoloPort desarrollado en Marina Bay (Singapur) como el primer paso dentro de una fina red organizada estratégicamente que permitirá unir los lugares más importantes de la ciudad, incluyendo aeropuertos o estaciones de tren. Incluso Skyports, en su página web trata de incentivar a distintos propietarios de terreno en el país asiático de cara a futuras alianzas, siempre que se cumplan los siguientes requisitos [61]:

- Superficie disponible mayor de 25000 pies cuadrados, lo que equivale a 2323 metros cuadrados.
- Tejados despejados o zonas de aparcamiento de varias plantas.
- Sendas de aproximación y despegue despejadas de obstáculos.
- Ubicación cercana a otros modos de transporte.

La elección de Singapur por parte de ambas empresas como lugar de lanzamiento de su proyecto no es casual. Parece evidente, y así lo demuestran numerosos estudios [62], que el grado de aceptación tecnológica y las oportunidades que ofrecen las ciudades más importantes del continente asiático supone un incentivo adicional para las marcas, que ven la oportunidad perfecta de acceder al mercado y mandar un mensaje positivo al resto del mundo. No en vano, una encuesta realizada un mes después de la exposición del VoloPort y la operación del Volocopter 2X reveló un índice de aprobación superior al 75 %, aunque aún existen reticencias a su operación de forma completamente autónoma [60].



Figura 4.1 VoloPort presentado en Singapur en 2019 [61].

#### 4.4.2 E-Port (EHang)

El fabricante chino EHang anunció en abril de 2020 su intención de construir un “puerto electrónico” para aeronaves completamente autónomas en la ciudad de Hezhou, en China. El diseño inicial consiste en un edificio de dos pisos, el primero destinado a la recepción y ordenación de pasajeros y el segundo que hará la función de sala de espera, dejando el tejado libre de obstáculos para la operación de aeronaves. Esto constituye una superficie total de 2500 metros cuadrados, con 4 plataformas para el despegue y aterrizaje que permitirán la operación de 4 aeronaves eVTOL simultáneamente [63]. EHang concibe este vertipuerto como una infraestructura para respaldar las operaciones comerciales y acelerar la comercialización de sus aeronaves, aunque sus demostraciones más destacadas se corresponden con las realizadas en la propia ciudad de Hezhou haciendo uso del versátil EHang 216 para transporte médico y emergencias.

Del mismo modo, el crecimiento esperado de la compañía china es aún mayor, y es que en marzo de 2021 reveló su asociación con el grupo de diseño del arquitecto italiano Giancarlo Zema (GZDG) para el diseño y construcción del primer vertipuerto europeo en Italia. Son pocos los detalles que por ahora han sido revelados, pero se espera que el vertipuerto tenga capacidad para generar más de 300 kW de potencia diarios para la recarga de las aeronaves a través de sus propios paneles fotovoltaicos[64].



Figura 4.2 Maqueta del E-Port [65].

#### 4.4.3 Urban Air Port Air-One (Urban Air Port/Hyundai Motor Group)

A finales de enero de 2021 la empresa británica Air Port hacía pública su asociación con la división de movilidad aérea urbana de Hyundai Motor Group, el Ayuntamiento de Coventry y el Gobierno de Reino Unido para el desarrollo del Urban Air Port Air-One en dicha ciudad inglesa. Esta unión se produce tras el Future Flight Challenge del Gobierno británico, donde el vertipuerto Air-One fue el ganador.

Urban Air Port propone un enfoque robusto, accesible e intermodal para la infraestructura, permitiendo operar a cualquier tipo de aeronave eVTOL y de forma totalmente complementaria al resto de medios de transportes de la ciudad. La extensión física del primer diseño del Air One es un 60% más pequeña que la de un helipuerto convencional, permitiendo su completa adaptación a cualquier zona del entorno urbano [66]. En este sentido, la compañía desarrolladora de infraestructura pretende lanzar 3 modelos de vertipuertos con características similares que se podrán instalar en pocos días y que permitirá su ubicación tanto en superficie (Terra One), como elevado (Air One) o en plataforma (Marine One). La operación de las aeronaves se producirá en la parte superior de la instalación, quedando reservada la parte interior de la estructura para operaciones de carga y mantenimiento y el control de pasajeros.

Por su parte, la empresa surcoreana Hyundai, la cual trabaja en el desarrollo de la aeronave eléctrica de empuje vectorial Hyundai S-A1, ve en el proyecto de Urban Air Port la oportunidad perfecta para conseguir un

enfoque más amplio del sector como paso previo a la comercialización de su aeronave, prevista para 2028 [67].

El programa estará financiado con 125 millones de euros del Fondo de Estrategias Industriales, y se espera que la infraestructura esté terminada a finales de 2021, dando servicio a operaciones de demostración de taxi aéreo, drones logísticos autónomos y operaciones de emergencia [68].



**Figura 4.3** Diseño del Urban Air Port de Coventry [66].

#### 4.4.4 Ferroviario

La multinacional española Ferrovial, como una de las empresas más destacadas en el sector de las infraestructuras a nivel mundial, está tomando cada vez más peso en el desarrollo de, lo que ellos consideran, el elemento clave para el desarrollo de la aviación eVTOL.

Ferrovial y la startup alemana Lilium anunciaron el pasado mes de febrero un proyecto para el desarrollo de una red de más de 20 vertipuertos en España. Esta red conectará estratégicamente las principales ciudades del país mediante infraestructuras sostenibles que no solo permitirán la operación de aeronaves, sino también su recarga y mantenimiento. Sin embargo este planteamiento y la alianza entre ambas compañías no es nada nuevo, y es que en enero de 2021 ya hicieron público su colaboración para la construcción de al menos 10 vertipuertos en Florida, Estados Unidos [69] [70].

El objetivo de Ferrovial es incorporar a otros fabricantes europeos como Airbus o la empresa española Tecnalia, con el fin de tener en cuenta más factores para el diseño de sus vertipuertos. Del mismo modo, también colaboran en el proyecto compañías especialistas en Big Data como DatActionS, que trata de estimar la demanda y volúmenes de operación previstos en servicios de taxi aéreo, así como las localizaciones más adecuadas para situar los distintos puntos de la red.

Fuentes consultadas de Ferrovial [39] en la Jornada sobre el Futuro de la Movilidad Aérea Avanzada organizada por iMOV3D a finales del mes de marzo indicaron que ante la falta de un entorno regulatorio propio de vertipuertos, actualmente están trabajando con la normativa existente sobre helipuertos, pero siempre considerando las características propias de las aeronaves eVTOL y sus requerimientos. Sin embargo, esperan una pronta incorporación de una normativa específica para aeronaves eVTOL, especialmente en términos de servidumbres menos restrictivas, ya que la performance de los helicópteros es muy diferente a la de estas aeronaves. Del mismo modo, trabajan en el corto plazo con operaciones pilotadas y bajo las reglas de vuelo visual (VFR), siendo esperable en un futuro poder operar bajo reglas de vuelo instrumental (IFR) y de forma autónoma, lo que ayudaría a reducir el precio de billete para el usuario.

Por otra parte, el gran volumen de operaciones esperado hace necesario un diseño de varias FATO y múltiples puestos de estacionamiento, por lo que pretenden trabajar con superficies entre los 5000 y los 10000 metros cuadrados.

No obstante, el proyecto está sujeto financieramente al acceso al programa de Fondos de Recuperación Europeos, y es que se estima que la construcción de los 20 vertipuertos costaría un total de 200 millones de euros, de los cuales un 50% deberían ser sufragados por estos [71].



**Figura 4.4** Vertipuerto propuesto por Lilium para la operación del Lilium Jet [72].





# 5 Mercados de la UAM

---

En el presente capítulo se pretende sintetizar una visión global de las ventajas y posibilidades que ofrece la UAM y las aeronaves eVTOL dentro de nuestro día a día. Para ello, primero clasificaremos algunas de las aplicaciones más relevantes, para posteriormente centrarnos en las que más opciones ofrecen dentro del entorno urbano y discutir cuál es la que más nos interesa en nuestro proyecto.

## 5.1 Aplicaciones

Son muchas las ventajas y posibilidades que ofrece la movilidad aérea avanzada fruto del empleo de aeronaves sostenibles con sistemas de control inteligentes y sistemas de comunicación cada vez más robustos. De forma genérica, las aplicaciones futuras de los vehículos aéreos autónomos pueden agruparse de la siguiente forma:

- Transporte comercial
  - Taxi aéreo
  - Conexión con aeropuerto
  - Transporte regional
- Servicios de emergencia
  - Ambulancia aérea
  - Transporte de órganos
  - Operaciones de rescate
  - Monitorización y control de incendios
- Logística
  - Reparto de última milla
  - Extensión de red de entrega a zonas rurales
- Seguridad
  - Vigilancia costera
  - Control fronterizo
  - Protección medioambiental
  - Control de eventos públicos
  - Vigilancia tráfico terrestre
- Mantenimiento
  - Mantenimiento de edificios
  - Monitorización de red eléctrica
  - Inspección de zonas no accesibles

- Manipulación de materiales nocivos
- Seguimiento de obras civiles
- Entretenimiento
  - Fotografía
  - Grabaciones de televisión
  - Turismo
- Investigación científica
  - Investigación atmosférica, geológica, ecológica y biológica
  - Estudio de huracanes
  - Observación de volcanes y zonas poco accesibles
- Agricultura y ganadería
  - Gestión de riego
  - Cultivo y fertilización
  - Localización de plagas
  - Control de rebaños

Si nos centramos en un ámbito puramente urbano, es evidente que la introducción de estos mercados vendrá marcada por la complejidad de las operaciones que requiere cada uno y los avances tecnológicos necesarios para que suceda. Debido a su potencial, y por tratarse de las aplicaciones que más se están estudiando para introducir la UAM en ciudades, consideraremos los siguientes usos con mayor profundidad:

1. Servicios de paquetería
2. Ambulancia aérea
3. Taxi aéreo

El primer aspecto importante a tratar será la fecha de entrada al mercado de cada aplicación. Esta vendrá marcada no solo por la complejidad técnica de las aeronaves o la red de infraestructura necesaria, sino también por la regulación vigente en cada momento. Parece claro que el reparto de última milla mediante UAS será anterior al resto de aplicaciones, en tanto en cuanto no implica el transporte de pasajeros y son sistemas de pequeñas dimensiones, por lo que será una aplicación extendida con la entrada en vigor del reglamento U-Space a partir de 2023, que permitirá la coexistencia de drones con el tráfico aéreo tripulado. En cuanto al empleo de aeronaves eVTOL en servicios de ambulancia aérea, este conlleva el transporte de personas pero dentro de situaciones de emergencia e interés público, por lo que su materialización será más cercana que el taxi aéreo. Este último, en cambio, requiere un gran soporte físico en tierra para permitir un uso eficiente y realmente útil para el usuario, y según estudios de mercado como el publicado a comienzos de 2019 por la NASA, esta no estará completamente preparada antes de 2030. Sí que podría ser una primera introducción de servicio de taxi aéreo las rutas fijas de conexión con los aeropuertos y zonas importantes de la ciudad, pero siempre bajo condiciones previamente establecidas y esquematizadas. [86]

En cuanto a la infraestructura terrestre necesaria, las bases para la recarga y operación de los UAS de reparto pueden ubicarse dentro de los propios centros logísticos, teniendo tanto por dimensiones como por complejidad un proceso constructivo mucho más sencillo y una fácil adaptación a las condiciones existentes. Para el caso de los servicios de emergencia los requerimientos serían mayores, y su ubicación en el entorno urbano debería estar en las inmediaciones de hospitales y centros sanitarios, como los actuales helipuertos. Sin embargo, la amplia red de vertipuertos necesaria para la aplicación de taxi aéreo y las dimensiones de estos, fruto de la alta demanda previsible, hacen de estas instalaciones un reto constructivo mucho mayor.

Otro factor relevante que debe tratarse es la percepción que el ciudadano tendrá de estas aplicaciones, puesto que al fin y al cabo la UAM no podrá ser integrada correctamente en ambientes urbanos sin que cumpla con unos estándares de seguridad y contaminación ambiental, acústica y visual. Es esperable que la aplicación con una aceptación social mayor sea aquella que esté al servicio del interés público y sea vista por la población como un elemento que mejore sus condiciones de vida actuales, por lo que el uso de

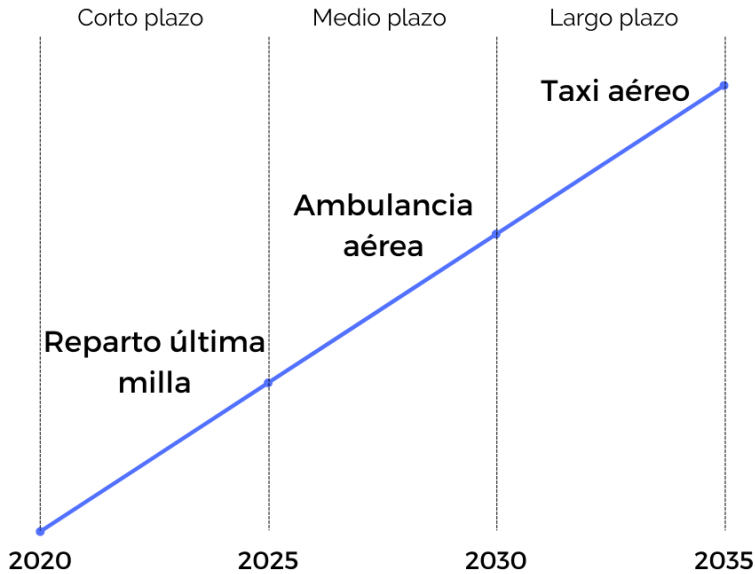


Figura 5.1 Incorporación al mercado de las aplicaciones de estudio.

aeronaves eVTOL en labores de vigilancia urbana, control de eventos y, por supuesto, servicios de emergencia, tendrán una aceptación mayor que otros servicios comerciales. En el caso de la entrega de última milla mediante drones, el impacto acústico es mínimo y al tratarse de actividades de corto alcance, serán vuelos completamente eléctricos desde las etapas más tempranas de la UAM. En cambio, el servicio de taxi aéreo masificado presenta aún grandes reticencias que deben ser pulidas a lo largo de la presente década. Campañas de concienciación y muestra de las ventajas que ofrece este nuevo medio de transporte, vuelos de prueba con estas aeronaves y la entrada al mercado de marcas punteras en el sector aeronáutico son bazas que tendrán un papel importante en la mejora de la percepción ciudadana de estas actividades.

	Reparto última milla	Ambulancia aérea	Taxi aéreo
Aeronave	●	● ● ●	● ● ●
Distancia	●	● ● ●	● ●
Infraestructura	●	● ●	● ● ●
Rutas	●	● ● ●	● ● ●

Complejidad: BAJA ● MEDIA ● ● ALTA ● ● ●

Figura 5.2 Cuadro comparativo entre las distintas aplicaciones urbanas.

A continuación se realiza un tratamiento más detallado de las etapas de crecimiento y las funciones que deberían cumplir estos servicios, a la vez que se ha estimado las características de la infraestructura que de soporte a las operaciones de las aeronaves y su ubicación en el entorno urbano.

## 5.2 Servicios de paquetería

### 5.2.1 Concepto de la aplicación

Se centra en el empleo de UAS en labores de reparto logístico, de forma que permita el envío de paquetes desde los puntos de distribución urbanos hasta los lugares finales de entrega mediante aeronaves autónomas y un sistema de gestión inteligente. Generalmente, estará focalizado en el transporte de paquetes livianos, cuyo peso máximo vendrá limitado por las características de cada aeronave. Aunque actualmente se encuentra en fase de desarrollo, se trata de una de las primeras aplicaciones en llevarse a cabo en entornos urbanos mediante aeronaves de este tipo.

El empleo de drones en tareas logísticas puede tener 3 vertientes:

1. Reparto de última milla
2. Transporte a centro logístico
3. Reparto en zonas rurales

Pese a que se trata de operaciones con un nexo común, son importantes las diferencias que existen entre unas y otras, y esto vendrá reflejado en las características tanto de las aeronaves como de la infraestructura necesaria para dar soporte a las mismas. Así, las operaciones de transporte intermedio entre los distintos centros logísticos de la empresa de reparto deben permitir el transporte de una carga mucho mayor que la que supondría operaciones individuales de reparto de última milla. Por ello, ya se encuentran en fase de desarrollo aeronaves como el Volocopter Volodrone, adaptado a vuelos logísticos y con una carga útil superior a los 200 kg. Sin embargo, para líneas de reparto finales en ciudades con entregas individualizadas, la mejor solución es el empleo de UAS de pequeño tamaño con avanzados sistemas de detección de obstáculos y comunicaciones. Un ejemplo representativo de este último caso es el Amazon Prime Air, con una carga útil para el transporte de 2.3 kg y una dimensión crítica de 91 cm, lo que lo convierte en una aeronave flexible y realmente útil para el transporte de paquetería de forma rápida y sencilla hasta los puntos finales de destino en entornos urbanos.[75][76]

Wing, empresa nacida en 2012 y subsidiaria de Alphabet (empresa matriz de Google), lleva ya varios años tratando de introducir la entrega de paquetes a través de drones, operando actualmente en 3 continentes. A comienzos del año 2019 empezó a realizar entregas de pedidos en las ciudades australianas de Camberra y Logan, y posteriormente en abril del mismo año se convirtió en la primera empresa de entrega mediante drones en recibir el certificado de operador aéreo de la FAA que le permite trabajar en EEUU, centrandose actualmente sus operaciones en Christiansburg, ciudad del estado de Virginia. En Europa, Wing está operando en Helsinki (Finlandia) desde junio de 2019. La compañía ha realizado ya de 175 000 vuelos con envíos comerciales, y estima que solo en la ciudad de Helsinki se habrán recorrido 11 millones de km menos mediante vehículos de transporte convencionales de aquí a 2030. Esto no solo constituye un ahorro económico por la operación de aeronaves autónomas y completamente eléctricas, sino que también contribuye notablemente a la reducción de la contaminación por  $CO_2$  y el número de accidentes en vías terrestres. Según la propia empresa, se estima que el tiempo de los envíos mediante drones se reduce a más de la mitad, con un coste medio del envío un 45% menor a los que hasta ahora conocemos.[39][77]

Con un objetivo similar, la empresa germana de paquetería DHL y EHang anunciaron en mayo de 2019 una colaboración para satisfacer los grandes desafíos que supone la entrega de paquetes en última milla de las congestionadas áreas metropolitanas de China. Una muestra de esta unión se encuentra en la ciudad de Dongguan, donde se ha establecido un corredor aéreo urbano de 8 km junto con 2 bases automatizadas que permiten operar a los dispositivos y realizar misiones de transporte de carga. Las operaciones se llevan a cabo mediante el EHang Falcon, formado por 8 hélices en 4 brazos que le permiten transportar una carga máxima de 5 kg. Se trata de una idea aún en proceso de prueba, pero que marcará el desarrollo de los sistemas de reparto de última milla en entornos urbanos.[78]

El empleo de UAS para el transporte de mercancía no solo permite optimizar las labores de reparto en áreas densamente pobladas, sino que también permite extender la red de reparto a zonas que actualmente no se encuentran accesibles, como pueden ser zonas rurales o áreas de difícil acceso. Es por ello que lejos de sustituir completamente a los sistemas de reparto terrestres, será un complemento a los mismos durante la primera fase de crecimiento de la UAM.

En un mundo cada vez más tecnológico e informatizado, las empresas de reparto han aumentado sus operaciones en los últimos años y su posicionamiento dentro de la red urbana es cada vez más importante. Sin embargo, ha sido a causa de la presente pandemia cuando esta situación se ha acrecentado notablemente, donde las medidas impuestas han hecho de las entregas *contactless* una de las mejores herramientas en el sector logístico. La entrega mediante drones autónomos supone un paso más en este concepto, permitiendo el envío en un tiempo menor de forma sostenible y con una eficiencia total del proceso considerablemente mayor. Por este motivo, el crecimiento anual esperado de las tareas logísticas mediante drones en este 2021 es de un 45.5% con respecto al año 2020 y, según la compañía Intrado, se espera que para el año 2025 el sector haya alcanzado los 3.6 mil millones de euros.[80]



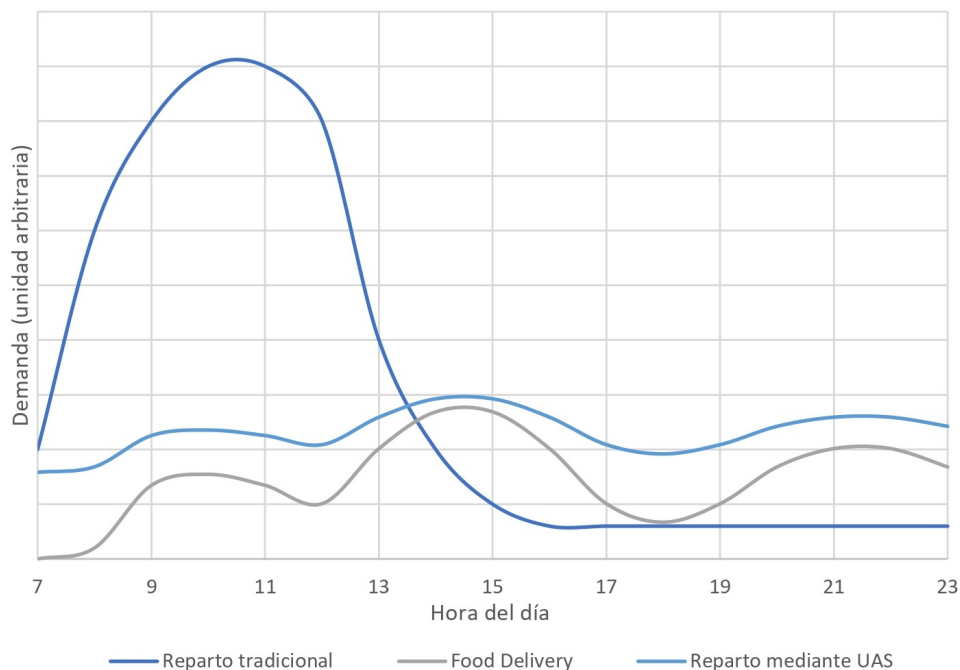
**Figura 5.3** EHang Falcon en servicios de paquetería con la compañía DHL [79].

**Tabla 5.1** Características de reparto aéreo de última milla.

Aeronave	UAS pequeños
Carga útil	No superior a 5 kg
Distancia	Aproximadamente 15 km
Tecnología	Necesario desarrollar sistemas eficientes de baterías, sistemas autónomos de vuelo, sistemas de detección de obstáculos (LiDAR, visión nocturna, etc.), sistemas de comunicaciones...
Rutas	Corredores aéreos fijos durante las primeras fases
Infraestructura	Puntos de recarga y de despegue automatizado dentro de los propios centros logísticos urbanos
Requisitos	BVLOS, aeronavegabilidad, integración UTM, seguridad en tierra, identificación, cumplimiento medioambiental...
Competidores	Servicios de reparto terrestres (Amazon Prime, Correos Express, Glovo, Uber Eats)

Centrándonos en el reparto de última milla, este podría tener 2 vertientes. Por un lado, abarca los envíos tradicionales de las empresas logísticas desde los centros de reparto urbanos hasta el punto de destino. Por otro, también se podrían encuadrar en misiones de reparto de última milla los cada vez más demandados servicios de *delivery* urbanos, que permiten conectar tiendas y restaurantes con el resto de la ciudad. Los UAS, como nuevo medio de transporte de reparto, podrían realizar ambas labores, ya sea directamente desde el

centro logístico de reparto o mediante la recogida previa de cada paquete en otro punto de la ciudad. Aunque es esperable que durante las primeras fases los vuelos se desarrollen a través de corredores aéreos fijos entre las distintas zonas de la ciudad, el objetivo final será la integración completa con el tráfico aéreo tripulado y que la entrega se pueda realizar en los domicilios particulares o donde el receptor del paquete desee. Según un estudio realizado por EASA en marzo de 2021 acerca de las potenciales aplicaciones de la UAM, la entrega en jardines o áreas privadas del receptor aumentaría la percepción y comodidad del usuario acerca de la entrega con drones en un 68 %, mientras que la recogida en parques o lugares cercanos, ya sea por imposibilidad de acceso a la vivienda en zonas urbanas o por la segregación del espacio aéreo, reduciría la aceptación hasta un 39 % [81]. Aún así, a medida que se vaya desarrollando y entrando en vigor una legislación específica que permita la operación de aeronaves autónomas en entornos urbanos y su posterior coexistencia con la aviación tripulada, los servicios de *delivery* mediante drones aumentarán considerablemente las posibilidades de entrega logística.



**Figura 5.4** Distribución de demanda diaria en reparto.

Quizá uno de los aspectos que más repercutirá en el usuario final de esta aplicación será la flexibilidad en la recogida del paquete. Según un informe publicado por la consultora Deloitte en febrero de 2020 acerca de la situación actual y los posibles retos que ofrece el reparto de última milla en España, el 98 % de las rutas y paradas se realizan entre las 7:00 y las 13:00 horas, lo que implica una masificación del tráfico y la limitación de recogida del destinatario en ese periodo de tiempo [82]. Esto se solucionaría en parte gracias al empleo de drones, puesto que la robotización en los sistemas de entrega permitirá la recepción del producto a la hora que más le convenga al usuario, adaptando el envío a la persona, y no la persona al envío tal y como estamos acostumbrados. Además, se conseguiría un reparto más uniforme y no tan concentrado en las horas de la mañana, permitiendo hacer un mejor uso del centro logístico y de las plataformas empleadas para el despegue de las aeronaves, y dando flexibilidad al receptor para recoger su pedido en cualquier momento del día. Para las entregas *delivery* de restaurantes, en cambio, los picos de entrega se seguirán manteniendo en 2 franjas claramente diferenciadas, como es lógico.

Actualmente, la legislación permite operar fuera del alcance de visión del piloto (BVLOS) a una altura no superior a 120 m y una velocidad máxima de 50 m/s. Sin embargo, por motivos de seguridad, es esperable que durante una primera fase de desarrollo no se alcancen velocidades de vuelo tan elevadas, operando por debajo de los 100 km/h. Igualmente, la altura esperada de crucero será aproximadamente de 50 m, de forma completamente segregada del tráfico aéreo actual. La entrega, por otra parte, se realizará a una altura del suelo superior a 5 m mediante un sistema extensible que permitirá a la aeronave no tener que realizar el aterrizaje completo, garantizando la seguridad en tierra a lo largo de todo el proceso. Para la presente estimación, se

ha supuesto una altura máxima de vuelo de 50 m y una velocidad de crucero de 80 km/h, de modo que la aeronave en operación de reparto tenga un radio de acción de hasta 15 km y pueda realizar la maniobra de entrega y de regreso al centro logístico en algo más de 20 minutos, un valor alcanzable por la gran mayoría de baterías que actualmente se encuentran en el mercado. El proceso de entrega mediante drones estará formado por las siguientes fases:

1. Pedido y preparación
2. Planificación de ruta y validación
3. Despegue automatizado
4. Recogida del paquete
5. Crucero
6. Entrega

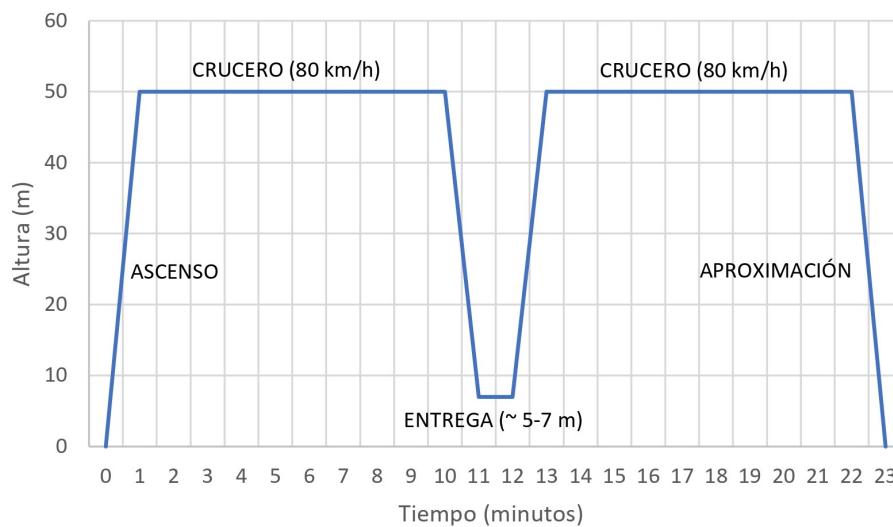


Figura 5.5 Fases del vuelo en el reparto mediante drones.

### 5.2.2 Estudio de la infraestructura necesaria

Aunque son muchas las ventajas que ofrece esta forma de reparto cada vez más autónoma e inteligente, esta herramienta debe ser respaldada por un centro logístico que disponga, por un lado, de una capacidad de almacenamiento adecuada para satisfacer la demanda, y por otro, de un sistema de control y procesamiento avanzado y adaptado a las exigencias de cada momento. Por tanto, las dimensiones del centro logístico vendrán marcadas por el número de operaciones y la demanda de envíos prevista a lo largo del día. La infraestructura destinada a la operación de las aeronaves, además de esta demanda, vendrá definida por la función que tiene el centro logístico dentro de la red. Así, para líneas finales de reparto se emplearán UAS que permitan transportar una carga máxima de 5 kg, mientras que para tareas de transporte intermedio se utilizarán aeronaves de mayor tamaño y con características diferentes, algo que lógicamente también repercutirá en el diseño final.

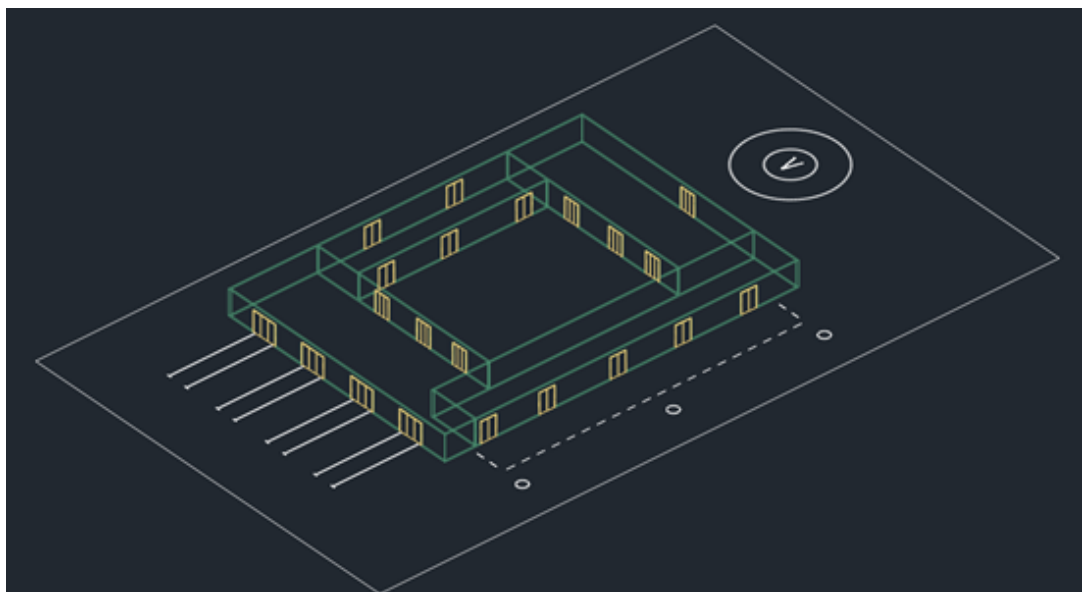
Generalmente, los centros de almacenamiento de las empresas logísticas se sitúan en los alrededores de los centros urbanos, de forma que los camiones y los vehículos de transporte puedan realizar la maniobra de forma correcta, y empleando vehículos de menor tamaño como furgonetas o coches para la entrega final y facilitar el acceso a todas las zonas de la ciudad. Por tanto, para el desarrollo de la infraestructura necesaria para el despegue de UAS y otras aeronaves las limitaciones de espacio no serán tan restrictivas como podría suceder en centros urbanos, pudiendo incluso construir en superficie.

Analizado el procedimiento y las características generales de la aplicación, un centro logístico adaptado a las operaciones de UAS para reparto de última milla estará formado por los siguientes elementos:

- Zona de descarga desde el lado tierra
- Almacén
- Sistema de control y procesamiento
- Oficinas
- Puntos de recarga y estacionamiento de aeronaves
- FATO para aeronaves de media y larga distancia
- Varias FATO para la operación urbana

Pese a que estamos hablando de aeronaves livianas, de reducido tamaño y con un funcionamiento sencillo, no existe una normativa específica para el diseño de la instalación que de soporte a vehículos autónomos con transporte de carga, por lo que una correcta organización del espacio disponible en tierra debe realizarse con objeto de garantizar unos mínimos de seguridad y conseguir aumentar la eficiencia del proceso. A lo largo de la presente estimación, y siempre de forma conservativa puesto que el funcionamiento y características de los UAS (en configuración multirrotor, mayoritariamente) son más sencillas y redundantes, se ha asemejado la performance y características de operación de estos vehículos a la performance Clase 3, en tanto en cuanto no conlleva el transporte de personas ni es objeto de la operación de reparto el realizar la maniobra completa de aterrizaje en entornos urbanos masificados.

En el siguiente esquema se muestra una posible distribución para un centro logístico de reparto adaptado a las operaciones mediante aeronaves en las inmediaciones urbanas. Se ha dispuesto en uno de los lados del edificio principal una zona de despegue para las operaciones de aeronaves con una dimensión crítica de 10 m, destinados a transportes de mercancía interurbanos. A su vez, se ha destinado una de las fachadas a la operación mediante UAS de reparto, delimitando una zona para la preparación y control de estos dispositivos, y distinguiendo 3 áreas de despegue. Suponiendo un tiempo de posicionamiento y despegue de 1 minuto, y un tiempo para la maniobra de aterrizaje y abandono de la zona de despegue de otro minuto, esta configuración permitiría realizar un total de 90 operaciones a la hora. Asimismo, una de las mayores limitaciones de los UAS actualmente es su autonomía, la cual va asociada a la batería empleada y que le permite volar un tiempo alrededor de los 30 minutos en los modelos más avanzados. Esto implicaría que las aeronaves podrían tener un radio de acción suficiente (entorno a 15 km) para cubrir la mayoría de zonas urbanas con las características actuales, pero sería necesaria la recarga de baterías después de cada operación.



**Figura 5.6** Vista isométrica del centro logístico adaptado al reparto mediante UAS.



Aunque las limitaciones de espacio en los centros logísticos son menos restrictivas por los factores ya comentados anteriormente, una disposición alternativa sería reservar la azotea para las operaciones de reparto mediante UAS. Esto permitiría una considerable disminución de la superficie necesaria, especialmente en centros logísticos pequeños y situados hacia dentro de la ciudad, pero por el contrario la manipulación de los paquetes y el funcionamiento de la instalación sería más complejo. Del mismo modo, se ha optado por una configuración en superficie para garantizar una distancia suficiente entre puestos de despegue y tomar un criterio conservativo que permita asegurar la seguridad operacional entre aeronaves y en tierra.

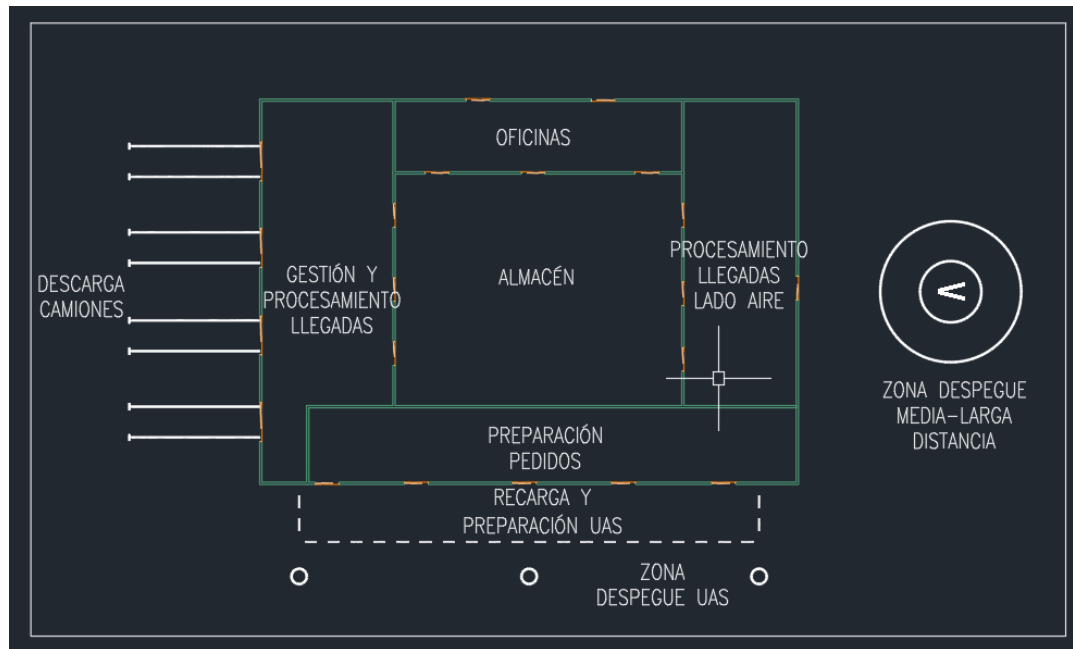


Figura 5.7 Vista en planta del centro logístico.

Una configuración formada por 3 puestos de despegue para operaciones de reparto de última milla y la zona de recarga y preparación de los mismos necesitaría una superficie adicional de  $400\text{ m}^2$  al centro logístico, y permitiría realizar aproximadamente 90 entregas por hora. Fruto de las características de esta forma de reparto, esta no se concentraría en determinadas horas del día, sino que tendría una curva más suave y un comportamiento más uniforme. Si consideramos un horario de reparto de 7:00 a 23:00, de forma que el servicio mediante drones trabaje tanto en funciones de reparto tradicionales como en funciones de *food delivery*, la instalación permitiría soportar un total de 1440 entregas diarias.

Pese a que la mayoría de drones comerciales presentan un tiempo de carga entre los 60 y 90 minutos, tecnologías como la *FlashBattery* permiten la carga rápida de baterías de litio en apenas 5 minutos [83]. Este último aspecto permitiría reducir el tamaño de la flota necesaria para cubrir todas las entregas diarias, pero por el contrario requeriría un abastecimiento de potencia mayor. En cualquier caso, estamos hablando de valores que no supondrán un factor crítico en el diseño de la instalación, como sí podría suceder en la recarga de baterías de aeronaves eVTOL con un tamaño mayor y características considerablemente más complejas.

## 5.3 Ambulancia aérea

### 5.3.1 Concepto de la aplicación

El transporte sanitario en situaciones de emergencia ha sido uno de los principales retos que ha debido afrontar la sociedad a lo largo de la historia, y la aviación como medio de transporte no ha sido ajena a esta necesidad. El Helicóptero Sanitario de Emergencias Médicas (HEMS) constituye hoy en día un elemento clave para la evacuación y el traslado de personas en situación de riesgo, proporcionando una primera respuesta rápida y segura. No obstante, el creciente desarrollo de las aeronaves eVTOL ha hecho que desde dentro del sector

HEMS estas sean una opción a considerar en los próximos años. Los vehículos eVTOL permitiría una mayor maniobrabilidad y la operación en zonas tanto urbanas como rurales donde el acceso con los helicópteros presenta mayores dificultades. Del mismo modo, los sistemas de propulsión redundantes y completamente eléctricos son una ventaja que toma cada vez más peso.

En el año 2018 ADAC Luftrettung, uno de los dos proveedores de HEMS en Alemania, anunció su colaboración con el fabricante VTOL también germano Volocopter, con el objeto de estudiar la viabilidad del uso de eVTOL en funciones de Servicios Médicos de Emergencia (EMS). Aunque son muchas las posibilidades que ofrece el empleo de multicópteros como el Volocopter VoloCity en funciones EMS, a lo largo de la primera etapa de crecimiento de la UAM la capacidad de estas aeronaves estará limitada, tanto en términos de espacio disponible como de carga útil debido a la baja energía específica de las baterías actuales, por lo que el estudio realizado por ADAC y Volocopter se centra en el transporte de los servicios médicos al lugar del accidente para la atención *in situ*, y no en el transporte de personas heridas mediante el uso de la aeronave. En cambio, a medida que se vayan produciendo avances en las características de estos vehículos, el desplazamiento de enfermos será el punto fundamental de esta aplicación. En diciembre del año 2020, ADAC anunció la reserva de 2 modelos Volocopter VoloCity para comenzar sus pruebas operativas en el año 2023.

Según el citado estudio, para que se cumplan unos estándares de operatividad y eficiencia del servicio sanitario, para abarcar un radio de acción de unos 45 km sería necesario que la aeronave proporcionara un alcance mínimo de 180 km, con una velocidad de crucero superior a 150 km/h. Esto permitiría, por un lado, dotar de gran libertad y autonomía al servicio de emergencia ante cualquier situación impredecible, y por otro, garantizaría que cualquier punto dentro de la zona de cobertura puede ser alcanzado en un tiempo no superior a 20 minutos.[84]



**Figura 5.8** Volocopter VoloCity adaptado a tareas EMS [85].

La infraestructura terrestre que soporte estas operaciones deberá estar adaptada a los requisitos sanitarios impuestos. Así, no sería necesario una terminal de pasajeros, pero sí una zona de alojamiento para los servicios médicos y la tripulación, a la vez que el área de movimiento tendrá menores dimensiones, puesto que el volumen de operaciones esperado es lógicamente menor al de aplicaciones centradas en el transporte comercial de pasajeros.[17]

Se trata, por tanto, de un mercado complejo que aún presenta grandes barreras tecnológicas en términos de alcance y autonomía de las baterías y los sistemas de almacenamiento eléctricos, a la vez que otras barreras legales y regulatorias. Por ejemplo, a diferencia del uso de UAS para los servicios de reparto de última milla, en el empleo de aeronaves eVTOL en servicios de ambulancia aérea no tendría sentido establecer corredores aéreos fijos y limitados, puesto que las situaciones de emergencia son impredecibles y muy diversas, por lo que una mejor integración y adaptación al tráfico aéreo actual debe ser impulsada. En cualquier caso, resulta evidente que la UAM en estas primeras etapas de evolución no reemplazará completamente al helicóptero sanitario en uso, sino que será una complementación al mismo.

**Tabla 5.2** Características del servicio de ambulancia aérea.

Aeronave	eVTOL (pilotados en un principio)
Carga útil	Hasta 500 kg
Distancia	Aproximadamente 180 km
Tecnología	Necesario desarrollar sistemas eficientes de baterías, aumentar la velocidad de vuelo, sistemas autónomos de vuelo, sistemas de detección de obstáculos (LiDAR, visión nocturna, etc.), sistemas de comunicaciones...
Rutas	Avisos no programados y rutas establecidas en el momento
Infraestructura	Vertipuertos estratégicamente situados que den cobertura a todos los puntos de la región. Además de FATO y puntos de recarga, necesaria instalación para el alojamiento del personal médico
Requisitos	BVLOS, aeronavegabilidad, integración UTM, seguridad en tierra, identificación, cumplimiento medioambiental...
Competidores	Servicios de emergencia tradicionales, HEMS

### 5.3.2 Estudio de la infraestructura necesaria

Tal y como se ha comentado, el servicio de ambulancia aérea con aeronaves eVTOL viene a complementar a los actuales servicios HEMS dentro de las primeras etapas de crecimiento de la UAM. De este modo, fruto de las limitaciones de autonomía y carga útil de estas aeronaves, permitirá el transporte de personal sanitario al lugar del accidente para una valoración in situ de una forma más rápida y accesible, pero no el traslado de enfermos hasta el centro sanitario. Por tanto, aunque normalmente los helipuertos sanitarios para operaciones HEMS se colocan en zonas anexas a hospitales o centros sanitarios adaptados a tal función, para el caso de un vertipuerto que sirva de soporte a operaciones de emergencia sanitaria con aeronaves eVTOL podría diseñarse una instalación completamente independiente que abarcara el alojamiento del personal sanitario y la zona de despegue.

La infraestructura deberá satisfacer, por tanto, dos funciones: por un lado la provisión, almacenamiento y preparación del material necesario (tanto referente a la aeronave como equipamiento médico) para cada operación, y por otro debería servir de acomodo para tripulaciones y personal sanitario. También es esperable que se trate de vuelos pilotados a bordo al menos hasta que los vuelos autónomos en rutas no programadas cumplan con las exigencias que esta aplicación requiere. Así, la aeronave estaría tripulada por un piloto y una o varias personas con formación sanitaria.

Las características del servicio que se pretende prestar también marcan en gran medida los requerimientos que debe cumplir la instalación. Por ejemplo, para servicios de rescate el radio de acción de la aeronave se extenderá más allá del ámbito urbano que podría abarcar las tareas de reparto de última milla o taxi aéreo, siendo necesario un alcance aproximado de al menos 80 km, según el estudio realizado por ADAC Luftrettung acerca del servicio HEMS en Alemania. Este se trata de un valor inalcanzable por un sistema puro de baterías actual, y puesto que no es posible estimar con los medios que tenemos hoy en día cuándo se podrán alcanzar estas distancias con sistemas completamente eléctricos, los conceptos híbridos serán la opción más utilizada en los servicios de rescate durante los primeros años de la UAM. Esto implica que al menos en las primeras etapas, la infraestructura deberá disponer de dos sistemas de suministro diferentes: de forma adicional al sistema de recarga de baterías habrá que incluir sistemas para el almacenamiento de combustible líquido.

Por otro lado, la infraestructura debería estar diseñada de forma que sea capaz de soportar operaciones de emergencia durante las 24 horas del día, algo que repercutirá en las características de las zonas de descanso

para la tripulación. Del mismo modo, una única FATO cumpliría con la función para las operaciones de las aeronaves y permitiría optimizar el tan demandado espacio en áreas urbanas. Se tratan, por tanto, de características muy similares a las que podría cumplir una helipuerto de emergencia sanitaria, pero puesto que la aeronave eVTOL no contempla una función de transporte de la persona auxiliada, el equipo médico que rodea el proceso es más económico y la infraestructura general, más sencilla. De forma genérica, la instalación debería contener al menos los siguientes elementos:

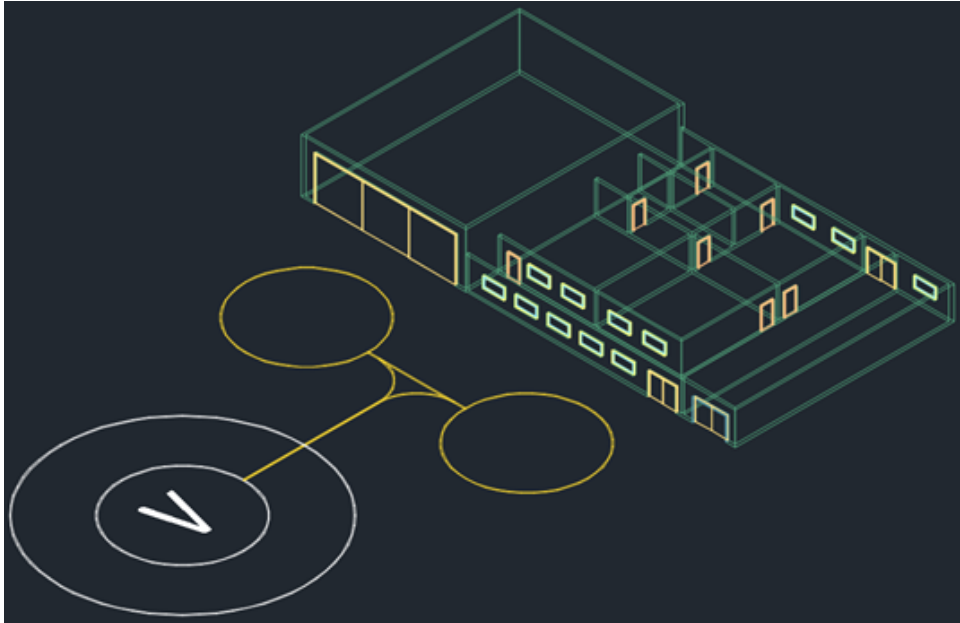
- Oficina para servicios médicos
- Zona de descanso, cocina, WC y cambiadores
- Almacén de equipos médicos
- Cuarto de preparación y limpieza de equipos y productos sanitarios
- FATO
- Instalación de recarga eléctrica
- Depósito de combustible

Pese a que las limitaciones actuales de carga útil de las aeronaves reducen en algunos aspectos las posibilidades que ofrecen los vehículos eVTOL como medio de emergencia sanitaria, el hecho de no depender de un hospital o infraestructura médica para el traslado de enfermos nos permite que la ubicación de la instalación para la operación de eVTOL en servicios EMS se flexibilice y no tenga por qué encontrarse siempre en las inmediaciones de un centro sanitario ya existente. De este modo, además de como elemento anexo a otras estructuras sanitarias, nuestra instalación podría constituir una estación independiente de nueva construcción cuya función sería dar soporte única y exclusivamente a los desplazamientos de personal sanitario hasta el lugar de la emergencia. Esto no solo reduce las restricciones en términos de localización del aeródromo, sino que también nos permitirá la adaptación a entornos donde las exigencias del espacio aéreo, la protección medioambiental o la protección acústica sean menos severas.

Además, dado que durante una primera etapa la función y ubicación de estas estaciones puede considerarse independiente a hospitales u otros centros de rescate, y que las características de las aeronaves eVTOL van a evolucionar a lo largo de las próximas décadas, el desarrollo de containers con un diseño flexible y adaptables a diferentes localizaciones y condiciones es una solución que aún importantes ventajas a considerar: permitiría la adecuación a las evoluciones técnicas de las aeronaves, tendría un diseño modular fácilmente implementable, posibilitaría el cambio de ubicación de forma rápida y sencilla y tendría un coste de construcción sustancialmente menor. Por el contrario, la vida útil de estos containers es considerada menor que la de las estructuras permanentes.

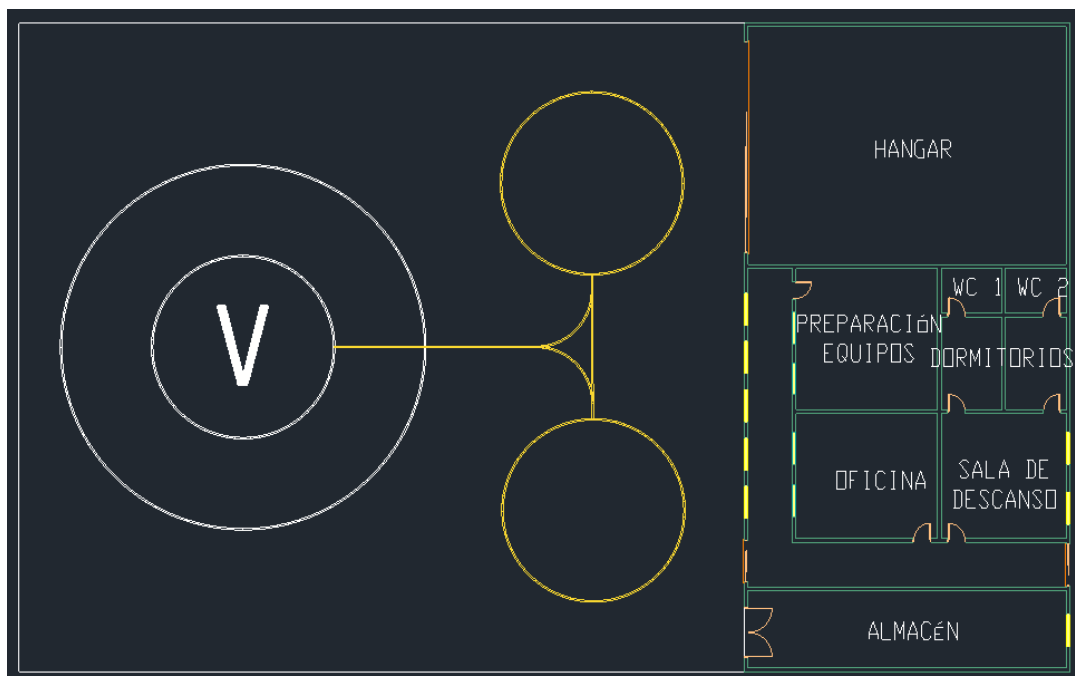
En cuanto a las restricciones aeronáuticas que imponen los vuelos de operaciones HEMS, estos se encuadran dentro de la Categoría A, la cual está relacionada con la performance Clase 1. Es decir, todo helicóptero que se emplee en servicios de emergencia deberá permitir un aterrizaje seguro o continuar el vuelo incluso en condiciones de fallo de un motor. Con objeto de alcanzar la máxima seguridad posible en la operación, esta condición es también extrapolable a las aeronaves eVTOL en general, y a los multihélices en particular, que serán los primeros vehículos de este tipo en llegar al mercado. Esto implica que el piloto tendrá una visión no restringida de la zona de aterrizaje a lo largo de todo el proceso, de forma que en caso de cualquier complicación se pueda abortar la operación. Durante el despegue, una vez que la aeronave haya alcanzado el punto de decisión en el despegue (TDP), aproximadamente a 40 m de altura en el caso de los helicópteros, la maniobra de despegue se considera finalizada, y a partir de la cual comenzaría el crucero. Igualmente sucede en el caso del aterrizaje, cuando al alcanzar el punto de decisión de aterrizaje (LDP) el piloto decide entre aterrizar o continuar el vuelo. Pese que actualmente no hay una legislación específica aplicable a aeronaves eVTOL en este sentido, a términos del presente estudio se asumirá que en nivel de seguridad y las exigencias requeridas serán comparables a la Categoría A existente en helicópteros.

A continuación, se muestra una posible configuración de una estación de emergencia para dar servicio a aeronaves eVTOL, donde destaca por un lado la zona de despegue, en la cual se ha considerado una única FATO capaz de soportar las operaciones de emergencia, y por otro las instalaciones auxiliares asociadas al servicio sanitario y el alojamiento de la tripulación. A efecto de los cálculos estimatorios, se ha considerado el Volocopter VoloCity, el que será el primer modelo medicalizado y adaptado a las tareas sanitarias que saldrá al mercado, y se ha trabajado de acuerdo a una performance Clase 1 en base a la justificación anterior.



**Figura 5.9** Vista isométrica de la instalación EMS.

Además de las estancias comentadas a lo largo del presente apartado, se ha añadido un hangar para el mantenimiento y adaptación de las aeronaves a las distintas tareas de emergencia, al igual que se ha considerado un sistema con dos puestos de estacionamiento y alojamiento para dos equipos médicos, de forma que la estación no quede fuera de servicio en situaciones de dos emergencias simultáneas. Para el desarrollo de este diseño modular sería necesario una superficie para la zona de despegue de aproximadamente  $1800\text{ m}^2$ , y una superficie para el alojamiento de la tripulación y el resto de estancias del complejo de unos  $500\text{ m}^2$ .



**Figura 5.10** Distribución de la instalación EMS.

Adicionalmente a estos servicios, la infraestructura deberá disponer de un sistema de carga rápida que garantice que cuando se produzca un aviso, las baterías de la aeronave se encuentren en un estado óptimo y permitan la mayor autonomía posible. Por ello, deberá situarse en un emplazamiento que permita una buena

conexión a la red eléctrica y sea capaz de suministrar la potencia necesaria para el funcionamiento de los equipos de carga rápida. Sin embargo, las exigencias en términos de potencia de la infraestructura serán menores que en el caso de otras aplicaciones donde el volumen de operaciones y la simultaneidad será mayor. Para el caso de nuestra infraestructura, con cabida para dos aeronaves, el sistema de carga deberá garantizar una potencia aproximada de 400 kW en cada puesto de carga. Esta aproximación se ha tomado a partir de una energía específica esperable de unos 350 Wh/kg, un valor alcanzable para las baterías de iones de litio en el medio plazo, y suponiendo un peso del sistema de baterías aproximado de 200 kg y un tiempo de carga rápida de unos 12 minutos. Además de la recarga de baterías cuando la aeronave está en tierra, un sistema de gestión de carga inteligente deberá disponerse en la instalación de manera que permita disponer siempre de un sistema de baterías adicional completamente cargado y empleable en el momento del aviso.

## 5.4 Taxi aéreo

### 5.4.1 Concepto de la aplicación

Es frecuente que cuando hablamos de UAM, instintivamente lo primero que se nos viene a la cabeza es la aplicación de taxi aéreo. Esta supone la culminación de un proceso de integración y adaptación de las aeronaves eVTOL en los entornos urbanos, y de hecho es el principal atractivo para muchas de las compañías que están entrando con fuerza en el sector. Así, según la consultoría de Porsche, que elaboró en 2018 un estudio acerca de la repercusión del transporte aéreo inteligente de personas en el ámbito urbano, para el año 2035 habrá más de 25 billones de euros en juego única y exclusivamente en este mercado. [33]

El servicio de taxi aéreo permitirá el traslado punto a punto de pasajeros que elegirán tanto la localización de salida como la de llegada, de forma que constituya un medio de transporte flexible y al servicio de los ciudadanos. Sin embargo, se trata, sin lugar a duda, del mercado más complejo de adaptar con el tráfico aéreo tripulado que actualmente conocemos, y una regulación mucho más precisa debe ser aún establecida. Por este motivo, en las primeras fases de la UAM, la alternativa más parecida a la de taxi aéreo serán los servicios de lanzadera ciudad-aeropuerto mediante aeronaves eVTOL, con rutas preestablecidas y que presentará, por tanto, una complejidad mucho menor en términos de infraestructura terrestre.

En cuanto a la aplicación de taxi aéreo como medio de transporte eficiente y que cubra todos los puntos de la ciudad, todavía quedan importantes obstáculos que superar. El primero y más evidente es desde un punto de vista tecnológico de los vehículos, los cuales deben garantizar unas condiciones de seguridad ya comentadas en el apartado 3 y además proveer un alcance mayor y que sea realmente rentable para las compañías. El segundo, en términos de infraestructura, si queremos cubrir todas las zonas del entorno urbano, los vertipuertos que permitan el embarque y desembarque de pasajeros deben tejer una fina red que conecte los principales puntos de la ciudad, algo que hace que el mercado de taxi aéreo sea prohibitivo al menos en el corto y medio plazo. El tercero y ya comentado, con respecto al establecimiento de un sistema robusto de comunicaciones que consiga la integración en el espacio aéreo. Y por último, y quizá el más importante, acerca de la aceptación social y el cómo hacerle llegar este nuevo medio de transporte al ciudadano. Es difícil estimar con los datos que se disponen actualmente un precio de partida para este servicio, pero parece claro que si bien en un primer momento será poco accesible para el ciudadano medio, este coste del billete debe ir reduciéndose si realmente se pretende que sea un medio de transporte competitivo, por lo que factores como el pilotaje autónomo y su consecuente ahorro en tripulación y servicios serán bazas que jugarán un papel fundamental en esta bajada de precio.

Además, y según las propiedades de las aeronaves en desarrollo, esta utilidad permitirá no solo la conexión punto a punto en zonas densamente pobladas, sino también entre distintas urbes, dando lugar a dos tipos de servicios similares en cuanto a concepto, pero que tendrán diferentes usuarios y competidores:

- Servicio intraurbano. Permitirá la conexión entre las distintas zonas de una misma ciudad, siendo considerado un medio de transporte urbano más. Como tal, sus posibles competidores serán los taxis terrestres, los autobuses urbanos y el metro.
- Servicio interurbano. Establece la conexión entre las principales ciudades de la región, por lo que requiere una infraestructura para la operación de las aeronaves mucho más amplia. Sus principales

competidores serán el autobús, el tren y el avión.

**Tabla 5.3** Características del servicio de taxi aéreo.

Aeronave	eVTOL autónomos (de 2 a 5 pasajeros)
Carga útil	Hasta 900 kg
Distancia	Aproximadamente 50 km en vuelos intraurbanos Aproximadamente 300 km en vuelos interurbanos
Tecnología	Necesario desarrollar sistemas eficientes de baterías, sistemas autónomos de vuelo, sistemas de detección de obstáculos (LiDAR, visión nocturna, etc.), sistemas de comunicaciones...
Rutas	En una primera etapa, rutas fijas. En el futuro, rutas elegidas según las condiciones del cliente.
Infraestructura	Vertipuertos con zonas de despegue capaces de soportar la demanda en horas pico, sistemas de recarga eléctrica y una terminal para controlar el flujo de pasajeros
Requisitos	BVLOS, aeronavegabilidad, integración UTM, seguridad en tierra, identificación, cumplimiento medioambiental...
Competidores	En vuelos intraurbanos: taxi, autobús urbano, metro, coche particular. En vuelos interurbanos: coche particular, autobús, tren, avión.

#### 5.4.2 Estudio de la infraestructura necesaria

A diferencia del resto de aplicaciones a las que dará cobertura la UAM, en el servicio de taxi aéreo la ubicación de nuestra infraestructura sí que constituye un aspecto primordial de estudio. Esto se debe a que, si queremos establecer un medio de transporte útil y al alcance de la población, el vertipuerto deberá desarrollarse en zonas de interés para el ciudadano y que le permitan conectar los puntos más importantes de la ciudad o aquellos en los que los accesos por vía terrestre están más limitados, como podría ser aeropuertos o estaciones de otros medios de transporte. Igualmente, es indudable que una estación en superficie facilitaría el acceso de los pasajeros al complejo y permitiría una mejor conexión con la ciudad. Sin embargo, esto no siempre será posible en núcleos urbanos masivamente construidos donde la superficie disponible es mínima y además, de un coste muy elevado.

Puesto que esta aplicación involucra el transporte de un alto número de pasajeros, los retos en términos de instalaciones y servicios auxiliares son elevados en comparación con otras infraestructuras de soporte de operaciones con aeronaves eVTOL. En este caso, el volumen de operaciones esperado a lo largo del día será muy elevado, y por tanto el vertipuerto deberá disponer de una configuración con múltiples puestos de estacionamiento que garanticen la correcta operación en el lado aire y además permitan la recarga de los sistemas de baterías de las aeronaves y la preparación de las mismas para el vuelo. En este sentido, la superficie para la operación de los taxis aéreos será, siguiendo la premisa anterior, considerablemente superior que la necesaria para las operaciones ya vistas, un hecho que no hace más que dificultar aún más la búsqueda de una superficie adecuada y que permita dar cabida a una infraestructura de tales dimensiones y además respete las condiciones en términos de obstáculos y demás requisitos aeronáuticos. Por ello, una de las soluciones planteadas y que mejor se podría adaptar a las ciudades de hoy en día sería la construcción elevada en azoteas de estaciones y otros edificios, de forma que las limitaciones de espacio serían un problema menor y a su vez las restricciones de obstáculos, menos exigentes. Por el contrario, la accesibilidad para los pasajeros y la conexión con el resto de la ciudad tendría mayor dificultad. Es aquí donde será necesario poner en balanza el objetivo final de nuestra estación de taxis aéreos y los requisitos sobre los que queremos diseñar la misma.

Además de la superficie destinada a las operaciones de las aeronaves, la instalación deberá disponer de sistemas adicionales centrados en dar servicio al usuario y garantizar su seguridad. Por ejemplo, un edificio que haga las veces de terminal de pasajeros será clave en la transición de personas desde el lado ciudad

hasta el lado aire, facilitando la distribución y el control de pasajeros y separando el flujo de operaciones de salida y llegada. Este factor será especialmente relevante en las horas punta del día, cuando la gente se movilice a sus puestos de trabajo mediante este medio de transporte o acuda a algún evento especial y la concentración de personas en la instalación sea superior a la que realmente se puede satisfacer. Por tanto, la gestión de colas y el estudio de las situaciones de máxima demanda serán elementos a estudiar en el diseño de la terminal de pasajeros. Adicionalmente, en la terminal se deberán ubicar también servicios relacionados con la compra de billetes, la información al pasajero, los controles de seguridad previos al vuelo y otras posibles estancias destinadas a la espera y el confort de los pasajeros. No obstante, la configuración de la terminal deberá realizarse de forma que se optimice el espacio disponible, por lo que generalmente estará formada por una sala diáfana en la cual se dispondrán las estancias necesarias.

Adicionalmente, los vertipuertos también podrían tener una función extra a la puramente aeronáutica, especialmente durante los primeros años de introducción de la UAM donde el objetivo es aumentar la percepción del ciudadano acerca de este nuevo medio de transporte y el impacto visual y acústico que le supone en su vida diaria. Así, la infraestructura también podría disponer de una sala de conferencias y eventos de modo que permita la realización de actos durante las horas menos demandadas del día y no influya así en el transcurso normal de las operaciones de taxi aéreo.

A priori, el radio de acción de las aeronaves en servicios de taxi aéreo puede ser variable, algo que también repercutirá notablemente en las condiciones y características generales que deberá cumplir la instalación. Este factor estará estrechamente relacionado con la función que tiene el vertipuerto de la red, como ya se comentó en el apartado 4.2. Los vertipuertos situados a las afueras de la ciudad permitirán disponer de una superficie mayor y servirán de soporte también a operaciones de media y larga asociados a vuelos interurbanos, mientras que los vertipuertos en zonas más céntricas de la ciudad tendrán una superficie menor y estarán focalizados en trayectos de corta distancia y que cubran un radio de acción similar al núcleo urbano. Este hecho nos marcará las características de algunos sistemas de nuestra instalación. Por ejemplo, en vertipuertos céntricos y mejor colocados, cuya actividad se centrará fundamentalmente en el transporte de pasajeros desde los distintos lugares de interés hasta la periferia u otros lugares de la ciudad, las aeronaves deberán garantizar un radio de acción comprendido entre los 20 y los 50 km. Esto implica que, con un buen sistema de gestión de la recarga de las baterías, el funcionamiento de las mismas podría ser completamente eléctrico, mientras que para aeronaves que pretenden satisfacer vuelos interurbanos de mayor distancia, sería necesaria una solución híbrida para garantizar el vuelo seguro, con las herramientas que se disponen actualmente en el sector.

Centrándonos en los vertipuertos urbanos, dado que las operaciones podrían satisfacerse empleando únicamente medios eléctricos, las exigencias en términos de potencia eléctrica serán muy elevadas. Este hecho se acrecentará más aún en las horas punta del día, en las que se deberá producir la carga simultánea de múltiples aeronaves de cara al posterior vuelo, y una potencia óptima para la recarga de las baterías deberá suministrarse en cada puesto de estacionamiento. Otra posibilidad será la recarga de las baterías de forma independiente a la aeronave, de manera que una vez que aterrice y deje a los pasajeros en la estación, se realice el cambio del sistema de baterías y pueda realizar un nuevo despegue.

Un vertipuerto para el respaldo de operaciones de taxi aéreo estará formado por los siguientes elementos:

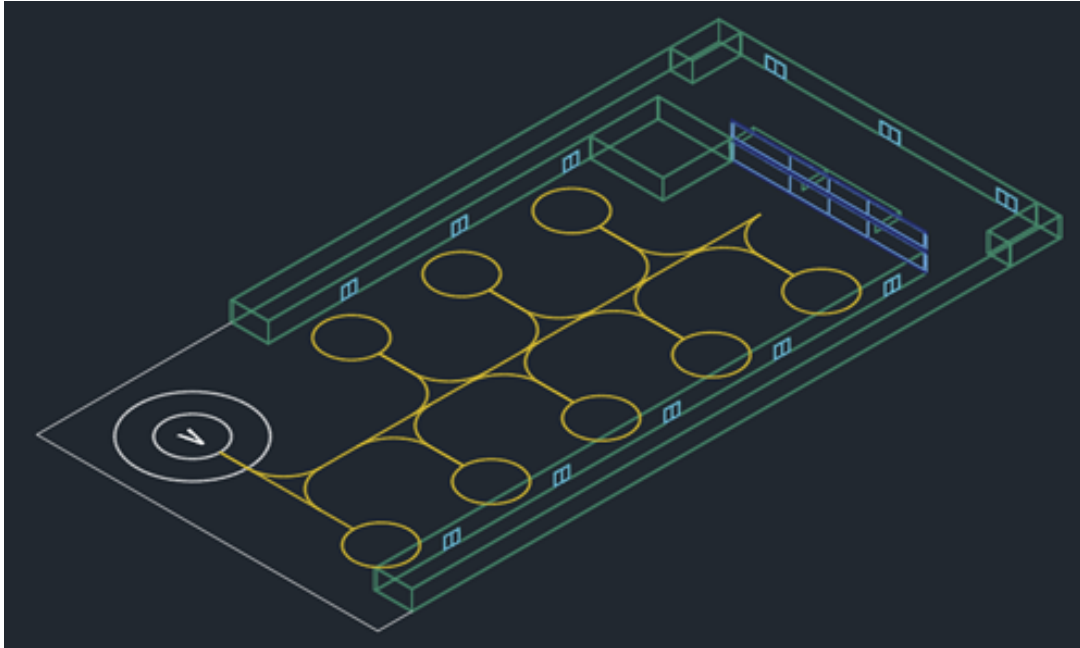
- Sala de recepción
- Zona de control y seguridad
- Mostrador de información y compra de billetes
- Sala de espera y WC
- Sala de descanso para tripulación
- Salas de embarque
- Hangar
- Puestos de estacionamiento
- Puntos de recarga eléctrica
- Varias FATO



Una de las mayores reticencias que presenta la normativa heliportuaria que muchos desarrolladores de infraestructura están empleando actualmente para realizar el diseño de vertipuertos es la clase de performance donde enmarcar este nuevo concepto de aeronave y su funcionamiento. Pese a que en algunos aspectos podrían existir similitudes entre las aeronaves eVTOL -especialmente los multicópteros- y los helicópteros, el comportamiento de los mismos durante las maniobras de despegue y aterrizaje y el resto de vuelo es diferente. Los multicópteros están formado por una configuración multirrotores que le confiere gran redundancia e independencia entre los distintos motores, de forma que tras el fallo de un motor la aeronave podría seguir en vuelo sin mayor dificultad. Del mismo modo, presentan un peso más liviano y las maniobras que realizan las aeronaves eVTOL son más sencillas. Es evidente que el adaptar la normativa que disponemos actualmente a estas aeronaves será un elemento clave en el desarrollo de la legislación que rija el desarrollo de la infraestructura que soporte las operaciones de taxi aéreo pero, por el momento, deben ser los propios fabricantes los encargados de definir y probar el comportamiento de las aeronaves en las distintas fases del vuelo. La performance de la aeronave y sus características no sólo repercutirán en la superficie necesaria para el movimiento en tierra, sino también en las superficies limitadoras de obstáculos que marcarán si un emplazamiento urbano es viable para la construcción de una estación de aerotaxis o no.

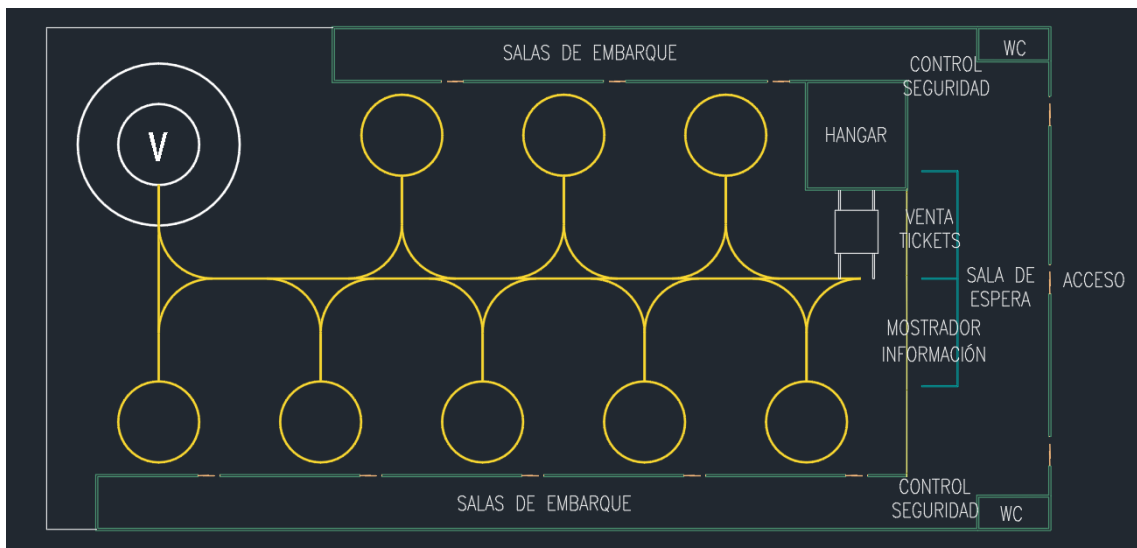
En las anteriores aplicaciones, la adaptación de las operaciones de las aeronaves eVTOL a la clase de performance que marca la normativa vigente resultaba bastante clara: para los servicios de paquetería, al tratarse de operaciones autónomas y con aeronaves de pequeño tamaño, se ha encuadrado dentro de la clase de performance menos restrictiva, la performance Clase 3; mientras que para el caso de ambulancia aérea, dado que se trata de operaciones EMS, se ha optado por mantener la performance Clase 1. Para la aplicación de taxi aéreo el planteamiento podría ser más diverso, según si se quiere realizar una estimación más conservadora o arriesgada. El Reglamento (UE) Nº 965/2012 indica que la Categoría A es aplicable a multimotores que, de acuerdo con su manual de vuelo, pueden continuar el vuelo con seguridad o efectuar un aterrizaje con seguridad. Así, las aeronaves eVTOL y especialmente los multicópteros, el modelo más implementable y certificable en los primeros años de la UAM, pueden establecerse dentro de la categoría A. Por otro lado, para el transporte comercial de personas en aeronaves de 9 o menos asientos (el límite al que actualmente aplica la SC-VTOL de EASA para aeronaves eVTOL) en entornos congestionados no hostiles se podrá operar de acuerdo a las performance Clase 1, 2 ó 3. Si bien considerando un criterio conservador se podría elegir la performance Clase 1 para la aplicación de taxi aéreo, esta impone condiciones demasiado restrictivas para la construcción en entornos urbanos, tanto en términos de superficie como de superficies limitadoras de obstáculos, y además no sería del todo realista dado el tipo de performance más sencilla que llevan a cabo estas aeronaves. Por tanto, a lo largo de la presente estimación, se ha considerado que la performance Clase 2 será adecuada para el servicio de aerotaxis. Esto cambiaría en el caso de que nos encontráramos en un entorno hostil congestionado, donde no fuera posible realizar un aterrizaje forzoso con seguridad dado que la superficie es inadecuada. En este último caso, el diseño de acuerdo a la performance Clase 1 sería obligatorio siguiendo la legislación actual.

A continuación, se muestra una posible distribución que tendría un vertipuerto urbano para la operación de aerotaxis. Se ha establecido una única FATO, que será el factor limitante para el número de operaciones de la instalación, pero el diseñar una infraestructura con múltiples FATOS y sus respectivas distancias de seguridad para la operación segura y simultánea entre ellas conllevaría dimensiones totales muy superiores de las que disponemos en los centros urbanos. La configuración con varias FATOS sí que sería la solución ideal en estaciones situadas a las afueras o en zonas cercanas a aeropuertos a modo de hub y con un volumen de operaciones diarios muy elevados. A su vez, se han dispuesto 8 puestos de estacionamiento que deberían estar provistos de sistemas de carga rápida o de sistemas de baterías intercambiables completamente cargadas. Los puestos de estacionamiento serían el punto de acceso de los pasajeros a la aeronave, disponiendo de una sala de embarque anexa, diáfana y para acceder a la misma hay que realizar un control de seguridad previo. El objeto final de la instalación sería realizar el mayor número de operaciones diarias y que el funcionamiento del conjunto durante las horas punta del día fuera ordenado y eficaz. Por ello, es preferible una sala de espera y una terminal diáfana que permita agilidad en las operaciones y de autonomía al pasajero. Suponiendo un tiempo conjunto de taxi, colocación y despegue de 1 minuto, una vez ya los pasajeros están montados y la aeronave completamente preparada, e igualmente para las operaciones de llegada, el vertipuerto podría dar cabida a 60 operaciones a la hora, supeditado también a la presencia de un sofisticado sistema de la gestión de carga de las baterías.



**Figura 5.11** Vista isométrica de la estación de taxi aéreo.

Si bien las dimensiones de la infraestructura vendrán marcadas por la superficie disponible, y a partir de la misma la configuración deberá ser adaptada, se ha estimado que para la construcción de un vertiport con 1 FATO y 8 puestos de estacionamientos sería necesaria una superficie entre los 8 000 y los 10 000  $m^2$ , de los cuales aproximadamente el 30% irá destinado a la terminal y los edificios necesarios para el control de pasajeros, y el 70% restante a la plataforma y la zona de despegue de aeronaves. Aunque la configuración mostrada se trata de un modelo de una única planta, en zonas masificadas y de poco espacio podrá darse una configuración de varias plantas, dedicando las más bajas al control y servicio al pasajeros y dejando la parte superior de los edificios para la operación de las aeronaves.



**Figura 5.12** Vista en planta de la estación de taxi aéreo.

Siguiendo un planteamiento similar al apartado 5.3.2, cada puesto de recarga necesitará una potencia alrededor de los 400 KW de corriente continua para la carga rápida de baterías. Por tanto, para satisfacer las franjas horarias de gran demanda en una estación con 1 FATO y 8 puestos de estacionamiento se requerirá una instalación de recarga que garantice entre 6 y 8 MW en situaciones de máxima demanda. Aún así, es esperable que cada estación disponga su propio sistema de respaldo y soluciones renovables que permitan

reducir el pico en algunos momentos del día.



## 6 Aplicación de estudio: servicio de taxi aéreo en Madrid

---

A lo largo del trabajo se han analizado de forma general los retos que plantea este nuevo concepto de movilidad aérea y los motivos que nos están llevando hacia él, las características y requisitos que deberán cumplir las aeronaves eVTOL en desarrollo, su funcionamiento y los desafíos que afronta su introducción en el mercado. A su vez, se han estudiado las posibles aplicaciones, la infraestructura necesaria para dar soporte a las mismas y las grandes ventajas que ofrece el uso de vehículos completamente eléctricos, de reducido tamaño, con capacidad para el despegue y aterrizaje vertical y, en un futuro, autónomos. Ahora, con toda la información recogida a lo largo de trabajo y las suposiciones llevadas a cabo en el apartado 5, vamos a centrarnos en el diseño y estudio de las condiciones que rodean a la infraestructura de soporte de una aplicación concreta. Puesto que el alcance del presente proyecto es limitado, existen aspectos que deberán ser tratados con una mayor profundidad en estudios posteriores, los cuales se irán comentando a lo largo de la sección.

### 6.1 Justificación y planteamiento del caso práctico

Como se ha comentado en el apartado 5.1, son muchos y realmente útiles los servicios que nos ofrece la Movilidad Aérea Urbana (UAM). Sin embargo, hay una aplicación que centra todas las miradas del mercado y sobresale con respecto al resto, y es que son cada vez más los fabricantes y compañías que entran en el sector única y exclusivamente para tratar de ofrecer el servicio de taxi aéreo. Pese a que se trata de la aplicación más lejana en el tiempo, las empresas lo ven como un servicio necesario y con grandes posibilidades, por lo que estas consideran el desembolso como una inversión de bajo riesgo.

No obstante, este no ha sido el único motivo por el cual nos vamos a centrar en el servicio de taxi aéreo. Al fin y al cabo, estamos hablando de la aplicación más compleja dentro de las ofrecidas por la UAM, puesto que supondrá la culminación de un proceso de integración de las aeronaves eléctricas y autónomas con el tráfico aéreo tripulado y el desarrollo de un nuevo medio de transporte inteligente. Esta complejidad se debe tanto a los requerimientos de la infraestructura que soporte la operación de los aerotaxis y las limitaciones de superficie en entornos urbanos masivamente construidos, como a las características propias de la aplicación: conlleva el transporte de un elevado volumen de pasajeros sobre áreas densamente pobladas.

Para el desarrollo de una estación que permita la operación de aerotaxis, además del estudio puramente aeronáutico, una avanzada prospección de mercado debe llevarse a cabo con objeto de conocer la percepción ciudadana y la ubicación más adecuada para el vertipuerto. En el mismo influirán, por ejemplo, la función que queremos dar al vertipuerto dentro de la red urbana o el volumen de pasajeros que queremos satisfacer. Por ello, pese a que se trata de una aplicación compleja y aún lejana, es esperable que las primeras estaciones para dar servicio a la aplicación de taxi aéreo se ubiquen en ciudades que cumplan las siguientes condiciones:

- Densidad de población elevada
- Dificultad de accesos e insuficiente infraestructura terrestre

- Congestión en las horas punta del día
- Elevada contaminación atmosférica
- Extensa área metropolitana
- Alto grado de aceptación tecnológica

Siguiendo estos criterios, otro aspecto que no debemos olvidar es la funcionalidad que le proporciona este medio de transporte al ciudadano, por lo que en el corto y medio plazo es más viable el desarrollo de estas infraestructuras en ciudades de gran extensión y población. Tal y como se indicó en el apartado 2, tanto Madrid como Barcelona son las ciudades de España que tradicionalmente han presentado una mayor congestión en sus centros urbanos. Adicionalmente, la contaminación atmosférica asociada al tráfico rodado en estas ciudades es también elevada, especialmente en Madrid. Esto, unido a que ambas son ciudades activas y con una alta densidad demográfica, hace que tanto Madrid como Barcelona puedan ser susceptibles de estudio, y sin duda alguna serán ciudades pioneras en la introducción del servicio de taxi aéreo de forma rutinaria.

Por otro lado, Sevilla también presenta cualidades para acoger operaciones de aerotaxis, y sin ir más lejos la compañía china EHang se interesó por esta situación a comienzos del año 2020, firmando un acuerdo de colaboración con el Ayuntamiento de Sevilla que actualmente ha quedado en *standby* a causa de la pandemia. Sin embargo, las características que convierten a Sevilla en una ciudad interesante para la operación de taxi aéreo son completamente diferentes las que podrían darse en Madrid o Barcelona. La capital andaluza presenta un casco histórico con muchos callejones y lugares poco accesibles en las zonas más céntricas y, además, se trata de una ciudad principalmente turística. En cambio, Sevilla cuenta con una población menor, una congestión durante las horas punta del día considerablemente más pequeña y, generalmente, trayectos más cortos que pueden satisfacerse a pie o mediante otros medios de transporte sin una excesiva pérdida de tiempo. Por tanto, la aplicación de taxi aéreo en Sevilla, al menos durante las primeras fases de crecimiento de la UAM, estaría más centrada en un servicio turístico que en un medio de transporte realmente competitivo y útil para toda la población.

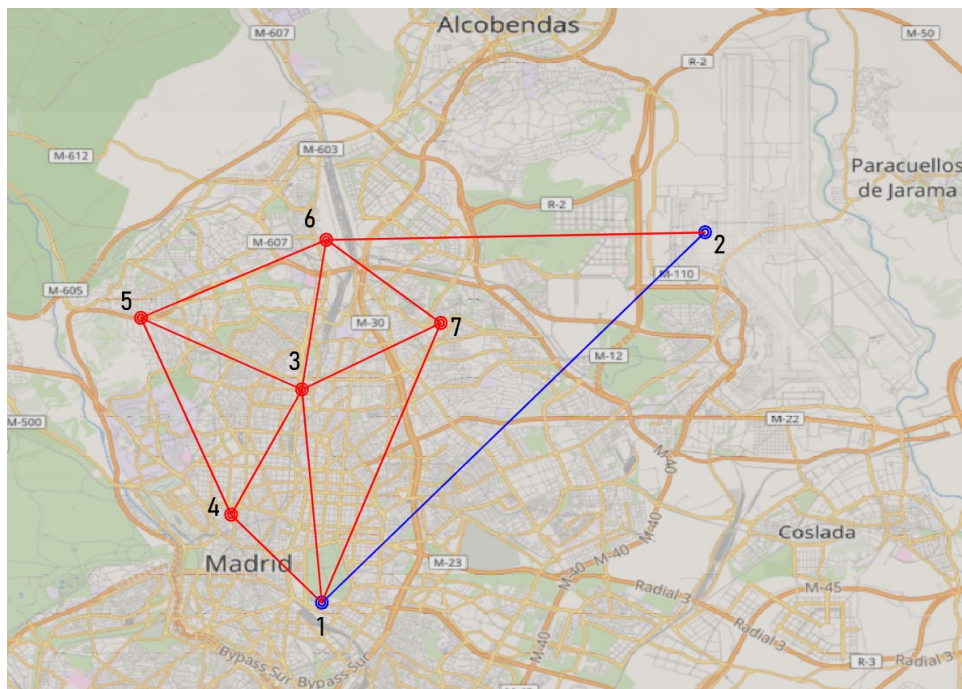
No obstante, no es descartable que en etapas futuras el servicio de aerotaxis como transporte público urbano llegue a una ciudad como Sevilla, especialmente como una alternativa sostenible de conexión entre las distintas estaciones de la ciudad y el aeropuerto. De hecho, la conexión entre la estación de Santa Justa y el aeropuerto de San Pablo ha sido un anhelo histórico de la ciudad hispalense que en los últimos meses se ha reactivado. La Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía formalizó en mayo de 2021 una licitación con objeto de definir dicho enlace. Posteriormente, en junio del mismo año se han recibido hasta nueve ofertas del concurso convocado, entre las cuales, por qué no, podría encontrarse la del empleo de aerotaxis para mejorar la accesibilidad de la conexión con el aeropuerto y proponer una solución alternativa al autobús, taxi y vehículo privado, los únicos medios de transporte activos actualmente.

En el presente estudio, y aunque la decisión debería estar supeditada a un análisis de mercado adecuado, nos centraremos en la ciudad de Madrid en base a las condiciones citadas anteriormente. El servicio de taxi aéreo en la capital no solo permitiría reducir la congestión y la tan preocupante contaminación de Madrid durante los últimos años, sino que también pondría al servicio del ciudadano una herramienta adicional para moverse a través de la ciudad en un tiempo menor y de forma más efectiva. Del mismo modo, trabajaremos en el diseño de la infraestructura que de soporte a operaciones urbanas de transporte de pasajeros entre los distintos puntos de la ciudad. Paralelamente, sería posible el desarrollo de vuelos interurbanos de mayor distancia entre vertipuertos con mayor capacidad ubicados en las ciudades más importantes del país.

Dentro de las posibilidades que ofrece la tecnología actual, y de acuerdo con la iniciativa U-Space que entrará en vigor a partir del 26 de enero de 2023, es esperable que en una primera fase el servicio de taxi aéreo comprenda rutas preestablecidas a través de corredores aéreos fijos, lo que hará de la ubicación de los vertipuertos dentro del mapa urbano un aspecto crítico. En el largo plazo, y una vez que se haya logrado la completa integración de la UAM con el tráfico aéreo tripulado, las aeronaves podrán operar según las predilecciones de los clientes y despegar y aterrizar en ubicaciones no tan restrictivas. Es por este motivo que las primeras rutas aéreas en establecerse serán aquellas que conecten el centro de la ciudad con aeropuertos u otras estaciones alejadas y de difícil acceso, permitiendo acercar las mismas e integrándolas en el conjunto de la ciudad. Este servicio de lanzadera centro-aeropuerto será posteriormente completado con un conjunto

de vertipuertos estratégicamente situados de forma que se defina una red de estaciones que permitan conectar cualquier punto de la ciudad de forma sencilla y posibilite al ciudadano mejorar su movilidad dentro de la misma. Por tanto, en una primera etapa sería necesario el desarrollo de 2 infraestructuras que estarán conectadas mediante el servicio de aerotaxis, una en el centro de la ciudad y la otra en las inmediaciones del aeropuerto.

Durante este proyecto, focalizaremos nuestra indagación en este servicio de lanzadera aérea que conecte la estación de Atocha con el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, dimensionado el vertipuerto situado en el interior de la ciudad y que será punto fundamental en la futura la red de estaciones urbanas que den servicio a las operaciones de taxi aéreo en la ciudad. Esta ruta, además de integrar en cierto modo el aeropuerto a la ciudad, permitiría una conexión intermodal realmente útil para los pasajeros que empleen tren y avión. Además, la estación de Atocha tiene una buena ubicación dentro del callejero madrileño, por lo que sería un punto accesible y que cumpliría perfectamente su función en la introducción del servicio de aerotaxis en Madrid. Aunque estudios más detallados y de gran alcance deben desarrollarse en fases posteriores acerca de las ubicaciones concretas del resto de estaciones en el mapa urbano, tanto en lo que concierne a un análisis de mercado como la búsqueda de una superficie disponible que sea adecuada y sin restricciones de obstáculos alrededor, a continuación se muestra una posible configuración de lo que sería la red de vertipuertos que permitan la operación de aerotaxis en Madrid. En azul se marca la ruta que estará disponible en la primera fase de desarrollo y sobre la que nos centraremos en este trabajo, apareciendo en rojo posibles rutas alternativas para etapas más lejanas.



**Figura 6.1** Posible red de vertipuertos en Madrid a largo plazo.

**Tabla 6.1** Distribución de vertipuertos en Madrid a largo plazo.

Estación	Zona
1	Estación de Atocha
2	Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas
3	Nuevos Ministerios
4	Centro
5	Zona universitaria
6	Estación de Chamartín
7	Arturo Soria

Tal y como se ha comentado anteriormente, para nuestra primera ruta sería necesaria el desarrollo de una infraestructura adecuada a uno y otro lado del trayecto. Sin embargo, las limitaciones que presentarán ambos casos son muy diferentes, siendo más complejo por la función que se le pretende dar y las restricciones de ubicación el vertipuerto situado en el interior de la ciudad. El vertipuerto situado en las inmediaciones del aeropuerto, en cambio, además de tener menos restricciones en términos de espacio y de obstáculos, tendrá aparejado un uso muy específico dentro de la red de vertipuertos urbana, por lo que generalmente sus dimensiones y volumen de operación serán menores. Aunque un estudio detallado acerca de las necesidades del cliente y del uso que le daría a este servicio deben llevarse a cabo de forma detallada, a lo largo de este proyecto se va a considerar un vertipuerto urbano provisto de 2 FATO que permitan operaciones simultáneas. Esto implica, suponiendo un tiempo de posicionamiento y despegue de 90 segundos, y otros 90 segundos para la maniobra de aproximación y rodaje hasta el puesto de estacionamiento, que el vertipuerto podría llegar a satisfacer 80 operaciones a la hora. Evidentemente, este número de operaciones vendrá limitado por la superficie disponible en las zonas más céntricas de la ciudad, algo que al fin y al cabo repercutirá en el número total de zonas de despegue que podemos disponer.

Pese a que no es sencillo evaluar la demanda esperada de un nuevo medio de transporte completamente diferente a los que existen hoy en día y que, además, en este momento aún genera un gran desconocimiento para el público general, es de esperar que, al menos para las primeras rutas que integrarán el aeropuerto con el resto de la ciudad, la distribución de demanda tenga un aspecto similar en cuanto a la repartición horaria con el de los vuelos aeroportuarios. Para etapas posteriores, cuando el resto de vertipuertos se desarrollen, la demanda será más variada y estará focalizada en un público más diverso (acceso al puesto de trabajo, ocio, turismo urbano...). Por tanto, es de esperar que nuestra estación situada en el centro de Madrid tenga una distribución de demanda similar -aunque con el volumen de operaciones mucho menor, como es lógico- a la del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, en tanto en cuanto el servicio de lanzadera estará destinado a personas que se desplazan al aeropuerto a tomar un vuelo o regresan del mismo. Siguiendo este patrón, el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas es uno de los principales hub europeos y, como tal, presenta un volumen de operaciones superior al del resto del país, acogiendo tanto vuelos continentales como intercontinentales. Nuestra ruta tendrá, por tanto, unos picos de operación bastantes similares en horario a los que podría tener el aeropuerto, con una única diferencia: existiendo, de forma general, en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas 3 picos de operación por encima del resto (de 6:00 a 8:00, de 12:00 a 15:00 y de 20:00 a 23:00, aproximadamente), será en el pico producido entre las 12:00 a las 15:00 en el que nuestro vertipuerto tenga mayor demanda. Esto se debe, además de factores propios del aeropuerto, a que es la hora en la que se produce el efecto salida de muchos trabajos y cuando la congestión de las carreteras es máxima, siendo el servicio de aerotaxi una buena herramienta para trasladarse al aeropuerto o viceversa. Así, la distribución de demanda que podría presentar la ruta centro-aeropuerto en Madrid podría tener el siguiente aspecto:

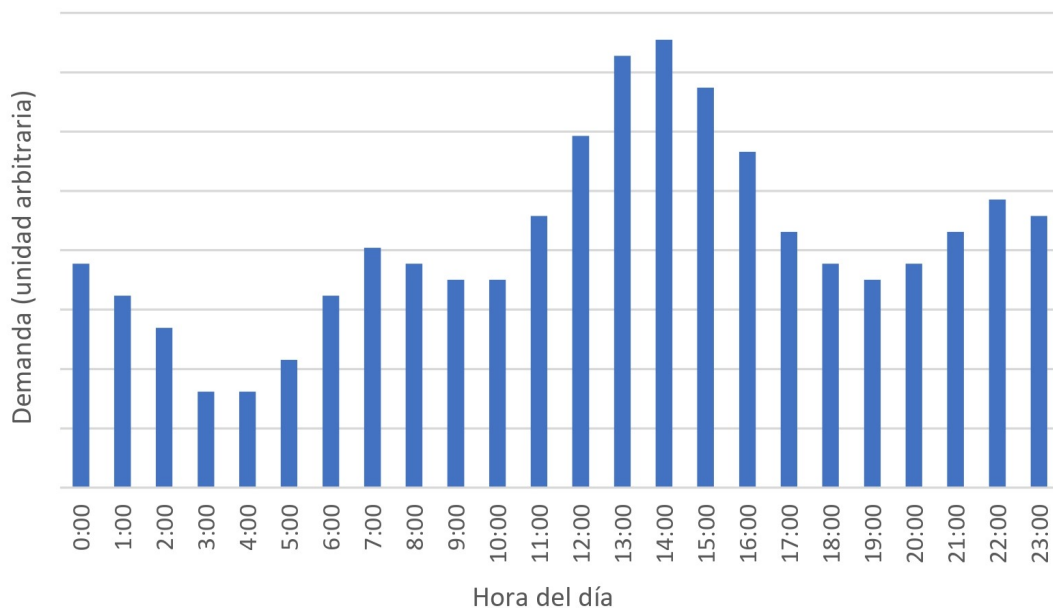
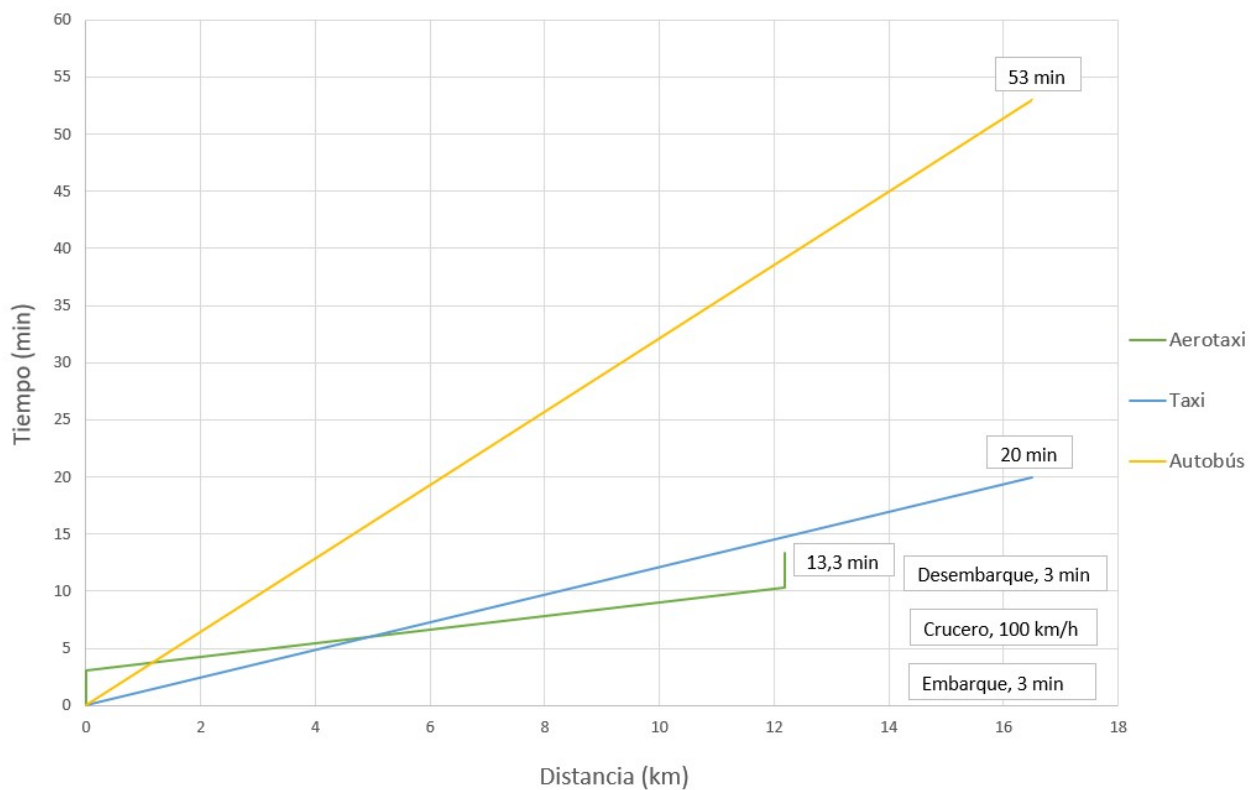


Figura 6.2 Demanda horaria para las operaciones de taxi aéreo Atocha-Barajas.



Son muchas las ventajas que presentaría este servicio frente a los medios de transporte que actualmente existen en la capital, y aunque al principio el coste del mismo será significativamente superior, el objetivo final de la UAM es que el precio del trayecto se equipare en la medida de lo posible al de otros medios de transporte urbanos y sea competitivo. Algunos de los aspectos positivos que tendría la ruta Atocha-Barajas son:

- Conexión intermodal entre estación de tren y aeropuerto.
- Posibilidad de reservar vuelos con antelación a la hora deseada.
- Trayecto fijo, con independencia de imprevistos terrestres asociados a horarios o accidentes.
- Más rápido y eficiente que el resto de vías de acceso al aeropuerto, tanto por las características tecnológicas de las aeronaves como por la evitación de atascos, horas punta, corte de carreteras, etc. La distancia lineal entre la estación de Atocha y el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas es de aproximadamente 12 km, por lo que tomando un tiempo para el embarque de pasajeros y despegue de la aeronave de 3 minutos, tal y como recoge Porsche en su estudio acerca de la UAM [33], e igualmente para desembarque y la maniobra de aproximación, y una velocidad de crucero de 100 km/h, un valor alcanzable por los primeros vehículos en tareas de aerotaxi, se podría realizar el trayecto en un tiempo aproximado de 13 minutos. Si lo comparamos, por ejemplo, con el tiempo de acceso mediante taxi o autobús urbano en un día de diario y en hora punta, los resultados son muy positivos, aunque se prevee que la diferencia sea aun mayor atendiendo a la velocidad a la que se realice el vuelo.



**Figura 6.3** Comparación del tiempo de acceso al aeropuerto.

- Considerablemente más seguro que el resto de medios de transporte terrestres, puesto que tanto fabricantes de eVTOL como reguladores están trabajando con una probabilidad de fallo de  $10^{-9}$ . Sin embargo, esta condición no es sencilla de inculcar a la población general, que como hemos visto a lo largo del trabajo, tiene reticencias a la operación de aeronaves eléctricas y autónomas sobre zonas densamente pobladas. Por tanto, convencer a la ciudadanía de que nos encontramos ante un medio de transporte seguro y mejorar su aceptación será vital para la exitosa introducción del servicio de taxi aéreo.

Una vez definidos los aspectos generales de la aplicación, se estudiarán las condiciones que, durante esta primera fase de crecimiento de la aplicación, debe cumplir el vertipuerto situado en el interior de la ciudad (en las inmediaciones de la estación de Atocha). Dicha investigación incluirá un estudio meteorológico de la zona, un análisis de las aeronaves empleadas en la aplicación de aerotaxi, un dimensionamiento geométrico de la instalación, un planteamiento general de nuestra terminal de pasajeros y una estimación de la potencia necesaria para el correcto funcionamiento de la estación. Pero antes de abordar en detalle los distintos puntos del estudio cabe resaltar que, debido al alcance de nuestro proyecto, no se han elegido una coordenadas exactas para la localización de nuestro vertipuerto, sino que lo que se va a realizar es un estudio de viabilidad del distrito del Retiro y un análisis de las condiciones que debería cumplir la infraestructura. Posteriormente, en futuros proyectos más específicos y una vez se elijan unas coordenadas definitivas para nuestro vertipuerto, sería necesario completar el estudio con un análisis del espacio aéreo circundante, incluyendo la búsqueda de aeródromos cercanos y posibles zonas que podrían imponer restricciones adicionales a la operación de las aeronaves.

## 6.2 Estudio meteorológico

El primer paso a llevar a cabo será el estudio de las condiciones meteorológicas existentes en nuestra zona de estudio, de forma que no supongan un impedimento a la operación de las aeronaves. De forma general, las aeronaves de tipo eVTOL, con un peso menor que los helicópteros, se van afectadas en mayor medida por el viento, aunque en el presente estudio también se analizarán los parámetros de temperatura y pluviometría. Adicionalmente, las condiciones de visibilidad presentes en la zona también podrían significar una limitación al correcto funcionamiento del vertipuerto, especialmente durante las primeras etapas, donde los vuelos serán pilotados a bordo. Por tanto, un estudio de visibilidad igualmente será necesario.

Los datos meteorológicos se han tomado de AEMET, en concreto de la estación “3195-Madrid, Retiro” [87], situada en el Parque del Retiro y a apenas 600 m de la estación de Atocha. Así, estos valores son bastante cercanos a los que existirán en la ubicación final de nuestro vertipuerto. Del mismo modo, siguiendo la recomendación de OACI en el Anexo 14 sobre el diseño de aeródromos, se han tomado los valores de los últimos 5 años completos, muestra más que suficiente para que los resultados sean representativos.

**Tabla 6.2** Datos de la estación meteorológica “3195-Madrid, Retiro”.

Estación	3195-Madrid, Retiro
Provincia	Madrid
Latitud	40° 24'43" N
Longitud	3° 40'41" O
Altitud	667 m

### 6.2.1 Estudio de temperatura

La temperatura en las inmediaciones de nuestro aeródromo influirá directamente en las actuaciones que realizan las aeronaves, en tanto en cuanto la densidad del aire presente varía con la misma. Los helicópteros actuales pueden volar en un rango de temperatura entre los -20 °C y los 50 °C, y es esperable que las aeronaves eVTOL puedan hacerlo en un intervalo similar. Por ello, salvo ligeras acepciones o vuelos a alturas elevadas, la temperatura no será un aspecto limitante en el desarrollo de las operaciones.

En el estudio se han tomado los datos de temperatura comprendidos entre 2016 y 2020, en base a la recomendación OACI anteriormente comentada. Además de la temperatura de referencia del aeródromo, se obtendrán los siguientes valores:

- **Temperatura media anual.** Media aritmética de las temperatura media anual de todos los años considerados en el estudio.
- **Media de temperaturas máximas absolutas.** Media aritmética de las temperaturas máximas absolutas acontecidas en todos los años considerados en el estudio.
- **Media de temperaturas mínimas absolutas.** Media aritmética de las temperaturas mínimas absolutas acontecidas en todos los años considerados en el estudio.

**Tabla 6.3** Temperaturas medias de Madrid.

Temperatura media anual	16.10 °C
Temperatura media máxima absoluta	21.17 °C
Temperatura media mínima absoluta	11.03 °C

La temperatura de referencia del vertipuerto, siguiendo la definición indicada por OACI, será la media mensual de las temperaturas máximas diarias correspondientes al mes más caluroso del año, siendo el mes más caluroso del año aquel que tiene la temperatura media mensual más elevada. La temperatura medias mensuales en Madrid son las siguientes:

**Tabla 6.4** Promedio de temperaturas medias mensuales en Madrid.

Mes	Temperatura media mensual
Enero	7.02 °C
Febrero	10.89 °C
Marzo	11.38 °C
Abril	13.75 °C
Mayo	19.71 °C
Junio	22.50 °C
Julio	28.21 °C
Agosto	25.44 °C
Septiembre	20.91 °C
Octubre	13.75 °C
Noviembre	11.20 °C
Diciembre	7.32 °C

Vemos como, de forma general, julio es el mes más caluroso, con un promedio de temperatura durante los últimos 5 años de 28.21 °C. Sin embargo, se ha comprobado que este hecho no se cumplió en 2018, siendo agosto el mes más caluroso.

**Tabla 6.5** Temperaturas medias mensuales del mes más caluroso del año.

Año	Mes	Temperatura media mensual
2016	Julio	28.05 °C
2017	Julio	26.76 °C
2018	Agosto	27.65 °C
2019	Julio	28.00 °C
2020	Julio	28.21 °C

**Tabla 6.6** Media de temperaturas máximas absolutas del mes más caluroso del año.

Año	Mes	Media de temperaturas máximas absolutas
2016	Julio	35.13 °C
2017	Julio	33.58 °C
2018	Agosto	34.01 °C
2019	Julio	34.60 °C
2020	Julio	35.28 °C

Si hacemos el promedio de los valores obtenidos en la última tabla, obtenemos una temperatura de referencia para nuestro vertiport de 34.52 °C.

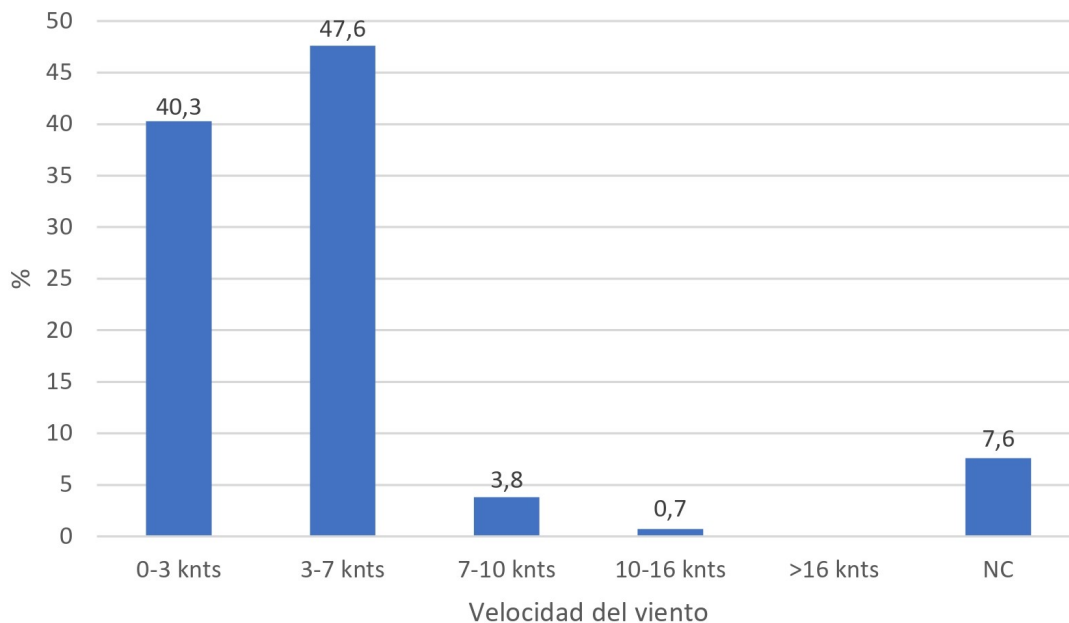
Del mismo modo, se ha comprobado que la temperatura máxima producida en la estación Madrid-Retiro durante los 5 años de estudio fue de 40.7 °C, mientras que la temperatura mínima fue de -3 °C. Ambos son valores que entran dentro del rango de operaciones previsto de las aeronaves eVTOL, por lo que podemos concluir que mayoritariamente la temperatura no será un factor limitante en nuestra estación de aerotaxis.

### 6.2.2 Estudio de vientos

El factor meteorológico más determinante para la ubicación del vertipuerto será la dirección e intensidad de los vientos dominantes. Cada una de nuestras zonas de despegue y aterrizaje deberán tener, de acuerdo a las recomendaciones de OACI, un factor de utilización igual o superior al 95 %, esto es, deben estar operativas y sin restricciones por vientos laterales ese porcentaje con respecto al total de horas que se encuentran en servicio. Según OACI [50]:

*«El diseño y el emplazamiento de los helipuertos deberían ser tales que se eviten operaciones a favor del viento y que se reduzcan a un mínimo las operaciones con viento de costado. En los helipuertos deberían incluirse dos superficies de aproximación con una separación angular por lo menos de 150°. Pueden proporcionarse otras superficies de aproximación, cuyo número total y orientación deben ser tales que se asegure un factor de utilización del helipuerto por lo menos del 95% respecto a los helicópteros a los que el helipuerto esté destinado a servir».*

Para vertipuertos, unas condiciones prácticamente idénticas deben tenerse en cuenta. Sin embargo, pese a que los helicópteros generalmente pueden operar con una componente de viento cruzado de 50 knts, para las aeronaves eVTOL este es un valor deseable en un futuro, pero inviable actualmente. Algunos de los modelos eVTOL actualmente en desarrollo permiten una componente de viento cruzado de 20 knts, por lo que es objetivo de los fabricantes el garantizar la correcta operación con componente de viento cruzado[17]. Así, las trayectorias de despegue y aterrizaje deberán orientarse de forma que coincidan con la dirección de los vientos dominantes y se eviten, en la medida de lo posible, las componentes de viento de costado. En el presente estudio se han considerado un total de 1663 observaciones, donde se han obtenido los siguientes resultados:



**Figura 6.4** Distribución de frecuencias del viento.

Al encontrarse la estación meteorológica del Retiro en un entorno protegido, dentro de la ciudad y del propio parque del Retiro, observamos como las intensidades del viento obtenidas en el periodo de estudio no superan los 16 knts. Esto es, en contra de otros aeródromos de nueva construcción situados en grandes descampados a las afueras donde las rachas de viento pueden ser mayores, la intensidad máxima del viento no será, como norma general, una limitación a la adecuada operación de las aeronaves. La distribución total de frecuencias según dirección e intensidad se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.7 Frecuencia de vientos según dirección y velocidad.

dir	0-3 knts		4-6 knts		7-10 knts		11-16 knts		+ 16 knts
0-360°	5	0.301 %	12	0.722 %	1	0.060 %			
10°	9	0.541 %	10	0.601 %	2	0.120 %	1	0.060 %	
20°	21	1.263 %	24	1.443 %	1	0.060 %	1	0.060 %	
30°	41	2.465 %	40	2.405 %	2	0.120 %			
40°	115	6.915 %	90	5.412 %	4	0.241 %	1	0.060 %	
50°	55	3.307 %	49	2.946 %	3	0.180 %			
60°	30	1.804 %	26	1.563 %	3	0.180 %			
70°	12	0.722 %	7	0.421 %					
80°	19	1.143 %	4	0.241 %					
90°	19	1.143 %	3	0.180 %					
100°	15	0.902 %	11	0.661 %					
110°	8	0.481 %	3	0.180 %					
120°	12	0.722 %	17	1.022 %					
130°	17	1.022 %	8	0.481 %	1	0.060 %			
140°	9	0.541 %	18	1.082 %					
150°	11	0.661 %	11	0.661 %					
160°	10	0.601 %	16	0.962 %					
170°	13	0.782 %	8	0.481 %					
180°	9	0.541 %	6	0.361 %					
190°	6	0.361 %	2	0.120 %	1	0.060 %			
200°	12	0.722 %	5	0.301 %					
210°	9	0.541 %	11	0.661 %					
220°	22	1.322 %	35	2.105 %	1	0.060 %			
230°	38	2.285 %	49	2.946 %	8	0.481 %	1	0.060 %	
240°	38	2.285 %	48	2.886 %	5	0.301 %	1	0.060 %	
250°	18	1.082 %	49	2.946 %	6	0.361 %	3	0.180 %	
260°	35	2.105 %	78	4.690 %	10	0.601 %	2	0.120 %	
270°	12	0.722 %	32	1.924 %	2	0.120 %			
280°	9	0.541 %	31	1.864 %	4	0.241 %			
290°	7	0.421 %	14	0.842 %	2	0.120 %			
300°	11	0.661 %	16	0.962 %	4	0.241 %	1	0.060 %	
310°	5	0.301 %	9	0.541 %	1	0.060 %	1	0.060 %	
320°	8	0.481 %	20	1.203 %	3	0.180 %			
330°	6	0.361 %	14	0.842 %					
340°	5	0.301 %	10	0.601 %					
350°			6	0.361 %					
Total	671	40.348 %	792	47.625 %	12	3.848 %	12	0.722 %	

Para la representación gráfica de estos resultados se ha empleado el software WRPlot. Vemos como existen dos direcciones dominantes: el noreste y el suroeste. A su vez, y tal como se ha comentado anteriormente, si imponemos una componente máxima permisible de viento cruzado de 16 knts, un valor para el cual las aeronaves eVTOL en desarrollo pueden soportar, vemos como el factor de utilización del vertipuerto sería superior al 95 % recomendado, puesto que ese valor de intensidad del viento no se supera en ningún momento.

Adicionalmente, para garantizar que el mayor número de operaciones se realizan con el viento de cara, se deberían seleccionar dos superficies de aproximación con una separación angular no menor de 150°. Siguiendo la distribución de frecuencias obtenida, vemos como existen dos direcciones principales para poder realizar las operaciones de despegue y aterrizaje: 40° y 260°. Para permitir una separación angular de 150°, finalmente se tomarán las direcciones de 40° y 250° como direcciones definitivas para los despegues y aterrizajes en nuestro vertipuerto. Entre ambas, y dadas las reducidas exigencias en cuanto a intensidad del viento en nuestro emplazamiento, se garantizaría el 100 % del tiempo de operación. Por último, la dirección dominante global es 40°.

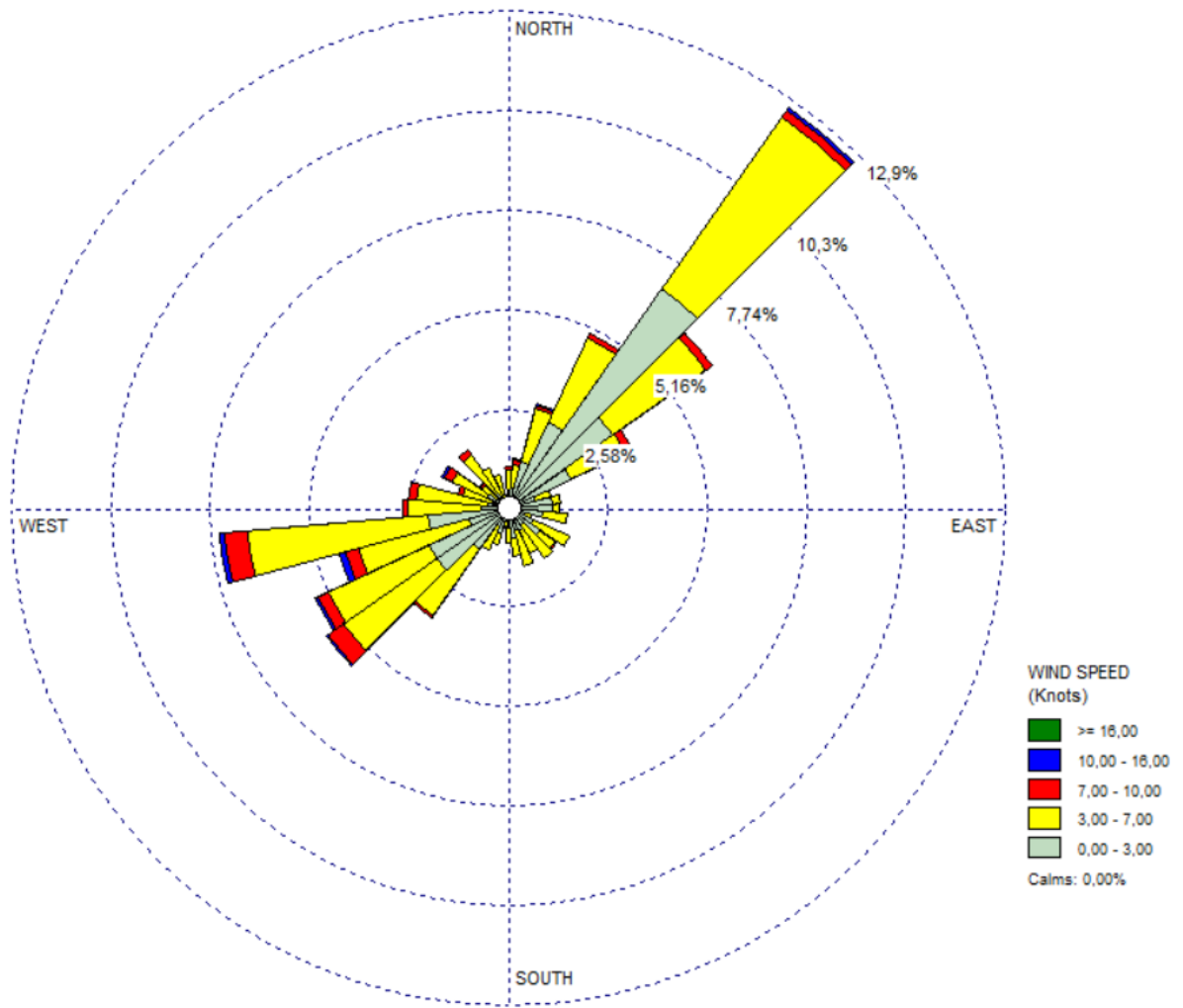
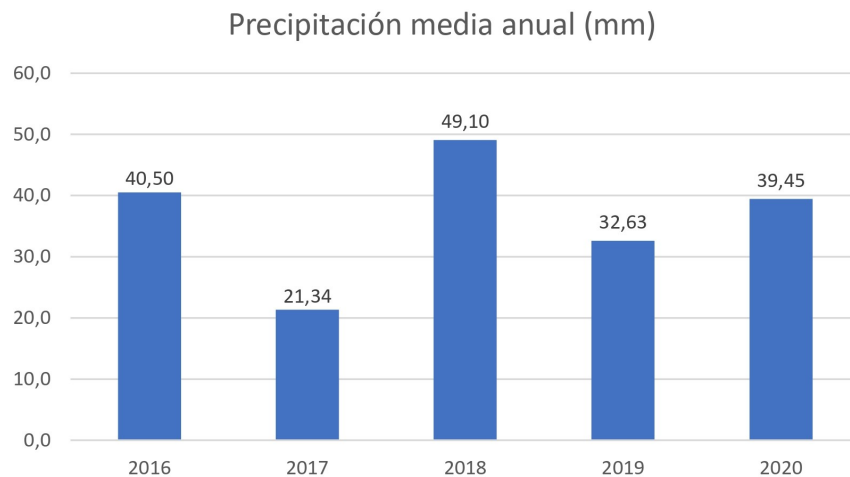


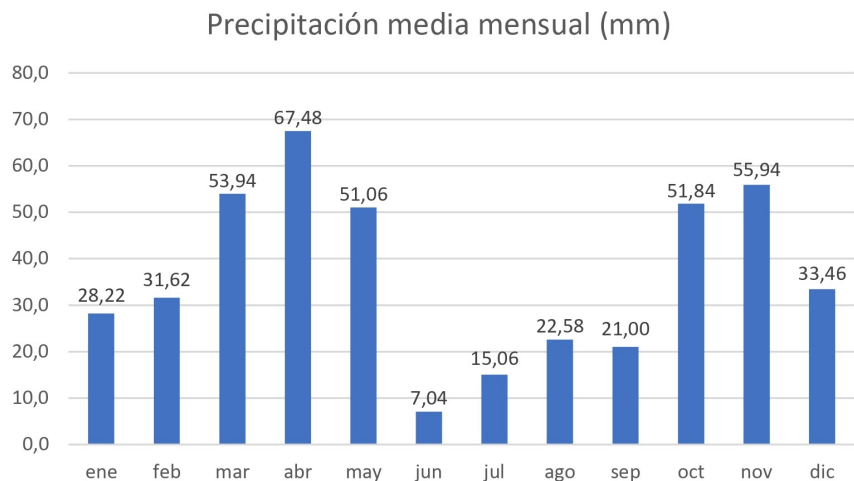
Figura 6.5 Rosa de los vientos.

### 6.2.3 Estudio de precipitaciones

Generalmente, y tal y como se vió en el apartado 3.3, las precipitaciones solo supondrán una limitación determinante para la operación de las aeronaves eVTOL cuando estas se produzcan en forma de granizo o vayan acompañadas de tormenta. No obstante, un adecuado estudio de pluviometría es necesario para dimensionar nuestra instalación y evitar cualquier tipo de inundaciones que puedan suponer una restricción al correcto funcionamiento del vertipuerto. Este hecho es especialmente relevante en zonas urbanas, como podría ser nuestro caso, donde por limitaciones de espacio las construcciones elevadas son una solución frecuente, y la acumulación de agua además de afectar a las operaciones de las aeronaves, tiene importantes consecuencias en la carga estructural de la infraestructura. Por tanto, en etapas posteriores debe realizarse un minucioso dimensionamiento del sistema de drenajes, tomando intervalos de tiempos más cortos y una buena elección del periodo de retorno. La precipitación media mensual en la estación del Retiro fue de 36.6 mm, teniéndose una media total de 94.1 días con lluvia al año.



**Figura 6.6** Precipitación media anual.



**Figura 6.7** Precipitación media mensual.

Adicionalmente, otros fenómenos que podrían afectar en mayor medida a la operación de las aeronaves, como la nieve o el granizo, se producen una media de 3 y 4.4 días al año, respectivamente.

Por último, la humedad relativa media anual en Madrid, tomada a partir de los datos del Instituto Nacional de Meteorología, es del 67.8%.



### 6.2.4 Estudio de visibilidad

Habiendo realizado un estudio de las condiciones del viento en nuestra zona de estudio, otro factor que puede afectar al tiempo de operación que puede tener nuestro vertipuerto son las condiciones de visibilidad existentes. Para este análisis, se han considerado los datos de visibilidad y techo de nubes del Plan Director del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, siendo una fuente fiable para el estudio y que por la situación y orografía circundante puede ser válida [88]. Además, no debemos perder de vista que las inmediaciones del aeropuerto serían el destino final de los vuelos de aerotaxi en esta primera etapa, y por tanto las condiciones de visibilidad en este emplazamiento estarán directamente relacionadas con las de nuestro vertipuerto. Los datos que se muestran a continuación provienen del Instituto Nacional de Meteorología, gracias a la estación meteorológica situada en el aeropuerto, y muestran el número de casos de simultaneidad de visibilidad (VVVV) y altura de nubes (hh).

**Tabla 6.8** Nº casos simultaneidad visibilidad y altura de nubes.

VVVV (m) / h.h (m)	0-29	30-59	60-89	90-119	120-149	150-179	180-239	240-299	300-449	450-899	900-2399	>2399	TOTAL
0-199	21	15	5	1			1		1		1	6	51
200-229	14	13	10	4							1	20	62
300-399	5	8	9	2					1			14	39
400-499	2	6	5	4		1						8	26
500-599	2	10	3	2		1			2		1	10	31
600-799	3	4	10	2			2	1				6	28
800-999	2	4	7	2	3		2					10	30
1000-1199	1	2	3	6	1	1	2		3			22	41
1200-1599	1	1	7	1	2	2		1	5	1		23	44
1600-2099	1	3	3	11	4	2	3	3	5	3	1	35	74
2100-2499									1	3		6	10
2500-4799	1		5	11	6	10	15	7	26	42	1	203	327
4800-8999	1		4	10	14	11	31	20	130	333	55	1328	1937
>9000				3	3	7	13	22	101	2182	1164	23011	26506
TOTAL	54	66	71	59	33	35	69	54	275	2564	1224	24702	29206

Si reorganizamos la tabla anterior y obtenemos la frecuencia de visibilidad y techo de nubes según intervalos, la distribución es la siguiente:

**Tabla 6.9** Observaciones y frecuencias de visibilidad.

Distancia (m)	Visibilidad	
	Observaciones	
0-199	51	0,175 %
200-229	62	0,212 %
300-399	39	0,134 %
400-499	26	0,089 %
500-599	31	0,106 %
600-799	28	0,096 %
800-999	30	0,103 %
1000-1199	41	0,140 %
1200-1599	44	0,151 %
1600-2099	74	0,253 %
2100-2499	10	0,034 %
4800-8999	1937	6,632 %
>9000	26506	90,755 %

Aunque actualmente no existen requisitos legales acerca de los rangos de visibilidad admisibles para la operación de multicópteros, puede asumirse que las condiciones impuestas en el Anexo V de EASA OPS se asimilarán en parte a estas nuevas aeronaves, en la medida que las habilidades cognitivas del piloto deberán ser las mismas. Igualmente, y tal y como se ha comentado a lo largo del trabajo, puesto que la idea a largo plazo de los fabricantes eVTOL es la de realizar vuelos completamente autónomos, los diseños actuales se

centran en la operación con un único piloto, siendo este un factor restrictivo a tener en cuenta para el tiempo de operación de nuestra aplicación.

**Tabla 6.10** Observaciones y frecuencias de techo de nubes.

Techo de nubes		
Altura (m)	Observaciones	
0-29	54	0,185%
30-59	66	0,226%
60-89	71	0,243%
90-119	59	0,202%
120-149	33	0,113%
150-179	35	0,120%
180-239	69	0,236%
240-299	54	0,185%
300-449	275	0,942%
450-899	2564	8,779%
900-2399	1224	4,191%
>2399	24702	84,579%

Con los datos mostrados anteriormente, puede concluirse que en el 97.388% de las ocasiones se cumplen con las condiciones de visibilidad mínimas (5 km) exigidas en el SERA, y un 98.490% se cumplen las condiciones mínimas del techo de nubes (300 m). En la situación más desfavorable, y considerando la coincidencia de ambos fenómenos, nuestro vertipuerto podría estar operativo el 95.917% de las veces operando bajo reglas de vuelo visual. Así, vemos como una de las mayores limitaciones que podría presentar este nuevo medio de transporte con respecto de lo que podría ser el tráfico rodado no es un aspecto demasiado restrictivo en nuestra zona de estudio.

## 6.3 Dimensionamiento de la infraestructura

### 6.3.1 Aeronave modelo de cálculo

El vertipuerto que de soporte las operaciones de aerotaxis debe cumplir con unos estándares de seguridad en el lado aire para todas las aeronaves que actúen en el mismo. Así pues, las dimensiones de la infraestructura y sus parámetros más relevantes vendrán determinados por los vehículos que empleemos en nuestra aplicación. De acuerdo con el Anexo 14 Volumen II de OACI para vertipuertos: “Al diseñar un helipuerto, tendría que considerarse el helicóptero de diseño crítico, es decir, el que tenga las mayores dimensiones y la mayor masa máxima de despegue (MTOW) para el cual esté previsto el helipuerto”.

Para el caso de los vertipuertos, la filosofía es idéntica. No obstante, debemos considerar un pequeño matiz: actualmente las aeronaves eVTOL se encuentran en pleno proceso de desarrollo y avances tecnológicos, por lo que la elección de un modelo específico no sería representativo de lo que pueden llegar a ser estos vehículos en el medio y largo plazo. Por ello, lo que se va a realizar es un estudio de los modelos ya citados en el apartado 3.4, para finalmente seleccionar las dimensiones y características críticas globales y que supondrán unos mayores requerimientos a la infraestructura. Esto permitirá, además de facilitar la operación de una amplia gama de aeronaves eVTOL, que nuestro vertipuerto esté preparado para posibles avances en el sector. Del mismo modo, actualmente la información existente acerca de las baterías es escasa, en tanto en cuanto es uno de los factores más limitantes de las aeronaves y tanto fabricantes aeronáuticos como empresas específicas buscan técnicas innovadoras a un ritmo frenético. En apartados posteriores se realizará una estimación de la potencia requerida para la recarga de estas baterías, de acuerdo a los parámetros más importantes que deberá cumplir la instalación para la correcta operación de las aeronaves y la optimización del vertipuerto.

Particularizando en nuestra aplicación de estudio, el servicio de taxi aéreo en tareas de transporte intraurbano no ofrece grandes requisitos en términos de alcance o autonomía, como sí podría suceder en vuelos de media y larga distancia, por lo que a priori podría satisfacerse con las aeronaves actualmente en diseño. Siguiendo

este criterio, y de acuerdo a lo comentado en el apartado 3.1, los multicopteros suponen la solución más sencilla e implementable durante esta primera etapa de la UAM. Además, constituyen, sin lugar a dudas, el tipo de eVTOL más certificable a corto plazo y su asimilación a la normativa heliportuaria existente, tal y como se está realizando en la parte final de este proyecto, entra dentro de la lógica. Los multicopteros, además de estar formados por rotores independientes y completamente redundantes, presentan unas dimensiones más reducidas que los helicópteros, lo que les dota de una gran flexibilidad en entornos urbanos. Centrándonos en los 3 modelos de multicopteros que se presentaron en el apartado 3.4, las características más relevantes para el diseño del vertipuerto son las siguientes:

**Tabla 6.11** Dimensiones de los multicopteros de estudio[41] [42] [43].

Modelo	Diám. exterior(m)	Altura(m)	Anchura tren de aterrizaje (m)	MTOW(kg)
VoloCity	11.3	2.5	2.3	900
EHang 216	5.61	2.1	1.5	600
CityAirbus	7.92	2.4	2.3	2200

El Airbus CityAirbus tendrá una capacidad total de 4 pasajeros, frente a los 2 pasajeros que permiten el Volocopter VoloCity y el EHang 216, aunque este último será completamente autónomo desde las primeras fases, por lo que ambas plazas están disponibles para los usuarios del taxi aéreo. Por tanto, el Airbus CityAirbus presenta un MTOW mayor y además, puesto que pretende satisfacer vuelos de mayor distancia (alcance esperado superior a los 100 km), los requerimientos de potencia y peso de las baterías serán mayores. Como se ha comentado, a excepción del EHang 216, los multicopteros en desarrollo serán pilotados a bordo durante la primera etapa de crecimiento de la UAM. Por otro lado, el diámetro más restrictivo de los mostrados viene impuesto por el anillo externo que presenta el Volocopter VoloCity, el cual sirve de soporte para un total de 18 rotores independientes. Si nos quedamos con los valores críticos de los modelos anteriores, nuestra aeronave de diseño tendrá las siguientes características:

**Tabla 6.12** Dimensiones de la aeronave de cálculo.

Diám. exterior(m)	Altura(m)	Anchura tren de aterrizaje (m)	MTOW(kg)
11.3	2.5	2.4	2200

### 6.3.2 Definición de áreas

Aunque son muchos los requerimientos que deberá cumplir el vertipuerto, el diseño del lado aire de nuestra infraestructura vendrá marcado según unos estándares que garanticen la operación segura y ordenada. Así, el dimensionamiento de las superficies de operación debe cumplir con la normativa aplicable y se realizará en función de la aeronave de cálculo que ya hemos seleccionado.

El pavimento del área de movimiento deberá estar capacitado para soportar las cargas estáticas y dinámicas para la aeronave con mayor MTOW que vaya a operar en el vertipuerto. En este caso, un firme rígido formado por una losa de hormigón cubriría las cargas de diseño exigidas, aunque dado que los requerimientos de estas aeronaves son reducidos en comparación con otro tipo de aeronaves más pesadas y realizan las maniobras de rodaje por aire a través de sus propios medios propulsivos, se podría plantear también la opción de un pavimento flexible compuesto por una capa asfáltica aplicada sobre una capa base y otra sub-base que permitiría conseguir un espesor menor al de la losa de hormigón.

La disponibilidad de espacio en superficie determinará la configuración final de la estación de aerotaxis, pero partiendo de la base de que aún no se ha definido una parcela concreta, nuestro objetivo será determinar la superficie que sería necesaria para la correcta operación de las aeronaves. Las áreas que se definen a continuación ya fueron expuestas en el apartado 4.1, particularizando ahora para nuestra aplicación y aeronave de estudio.

- **Área de aproximación final y de despegue (FATO)**

Aunque desde un punto de vista normativo no existen restricciones a la forma de la FATO, esta debe ser capaz de soportar la maniobra de aproximación y de despegue de la aeronave de cálculo.

La FATO estará despejada de obstáculos, de forma que cualquier elemento que pudiera interferir en la operación de las aeronaves debe quedar por debajo del nivel de la FATO o alejado de la misma.

Para vuelos destinados al transporte de personas mediante helicópteros en zonas hostiles congestionadas, como podrían ser los centros urbanos, se exige la performance Clase 1. De igual manera, para aeronaves eVTOL, la definición intrínseca de performance Clase 1 deberá cumplirse. Sin embargo, fruto de las características de este nuevo concepto de aeronaves, con un funcionamiento más sencillo, redundante y con un peso menor, las exigencias de diseño expuestas en la normativa heliportuaria sea son demasiado restrictivas. Ante esto, es esperable que la legislación específica acerca de vertipuertos relaje estas medidas y adapte el diseño de áreas y superficies del aeródromo a las particularidades de las aeronaves eVTOL.

Para aeronaves con performance Clase 1, de acuerdo al Volumen II del Anexo 14 de OACI sobre helipuertos, el tamaño y la forma de la FATO deberán ser suficientes para que contengan un área dentro en la que pueda trazarse un círculo de diámetro igual o superior a  $1D$ , siendo  $D$  la dimensión crítica de nuestra aeronave de cálculo. En nuestro caso, la dimensión crítica es de 11.3 m, y por tanto la FATO deberá tener un diámetro igual o superior a 11.3 m, tomando finalmente un diámetro de 12.3 m.

Asimismo, la pendiente de la FATO será la suficiente para evitar la acumulación de agua en la misma, pero la pendiente media en cualquier dirección no deberá exceder el 3%.

- **Área de toma de contacto y elevación inicial (TLOF)**

Estará emplazada dentro de la FATO, y será de tal extensión que comprenda un círculo cuyo diámetro sea al menos  $0.83D$  de la aeronave de cálculo. Por tanto, para nuestra aeronave la TLOF tendrá un diámetro de 9.4 m. La pendiente no deberá exceder el 2% en ninguna dirección.

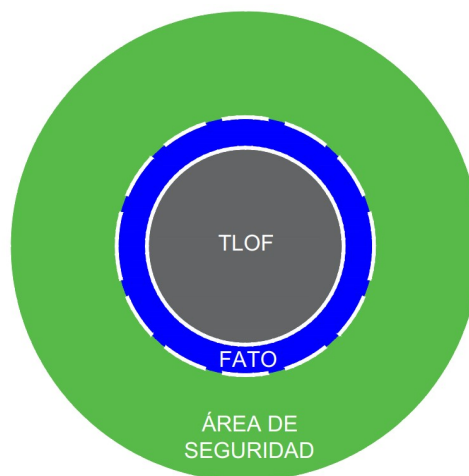


Figura 6.8 FATO, TLOF y SA.

- **Área de seguridad operacional (SA)**

La FATO estará rodeada de un área de seguridad operacional que se extenderá hacia afuera de la periferia de la FATO hasta una distancia de 3 m o de  $0.25D$ , lo que sea mayor. Además, el diámetro exterior del área de seguridad será de al menos  $2D$  si la FATO es circular, como sucederá en nuestro caso. Del mismo modo, deberá existir una pendiente lateral que se eleve a  $45^\circ$  desde el borde de la SA hasta una distancia de 10 m en la que no penetrarán obstáculos, salvo que estén a un solo lado de la

FATO. Por otro lado, no se permitirán objetos fijos por encima del plano de la FATO en la SA, excepto si se trata de objetos frangibles y que por función deban estar colocados en la SA.

Así, siendo  $D=11.3$  m en nuestra aeronave de cálculo, la SA empezará a 5.65 m del centro de la FATO y se extenderá hasta los 11.3 m, o lo que es lo mismo, tendrá un diámetro exterior de 22.6 m.

- **Calles de rodaje**

Como vimos en el apartado 4.1, las calles de rodaje de nuestro vertipuerto serán aéreas o en tierra atendiendo a las características de las aeronaves que hacen uso del mismo. En este caso, es esperable que las aeronaves eVTOL en general, y los modelos elegidos en particular, se desplacen por la instalación mediante vuelos a baja altitud y velocidad a través de sus propios medios.

La anchura de la calle de rodaje aéreo será por lo menos el doble de la anchura máxima del tren de aterrizaje (UCW) de las aeronaves para los que esté prevista la operación. Particularizando en nuestra aeronave de cálculo, esta tiene una anchura del tren de aterrizaje de 2.4 m, y por tanto la anchura de la calle de rodaje será de al menos 4.8 m. La pendiente transversal de la calle de rodaje no deberá exceder del 10 %, y la pendiente longitudinal del 7 %.

- **Puestos de estacionamiento**

Dado que las estaciones para la operación de aerotaxis tendrán un alto volumen de operaciones, una configuración con múltiples puestos de estacionamiento debe disponerse. El Volumen II del Anexo 14 de OACI permite una gran flexibilidad para el emplazamiento de las mismas, aunque es recomendable no situarlas debajo de las trayectorias de vuelo. Por otra parte, los puestos de estacionamiento tendrán varias misiones dentro del vertipuerto: además de la función puramente aeronáutica, deberá permitir el embarque seguro de los pasajeros y la recarga rápida de baterías. Por tanto, su ubicación tendrá un papel relevante en el dimensionado final de nuestra instalación.

Las dimensiones del puesto, cuando esté destinado a la utilización para virajes estacionarios, como podrá suceder con los multihélices, deberán contener un círculo cuyo diámetro sea de al menos 1.2D. Por tanto, el diámetro mínimo para los puestos de estacionamiento de nuestra instalación serán de 13.56 m. Además, los puestos de estacionamiento permitirán el drenaje rápido, pero la pendiente no deberá exceder el 2 % en ningún punto.

### 6.3.3 Superficies limitadoras de obstáculos

Una de las condiciones más restrictivas que deberá cumplir el vertipuerto es su ubicación en zonas urbanas edificadas en altura y que pueden suponer importantes limitaciones a las trayectorias de las aeronaves. Por ello, se definen una serie de superficies limitadoras de obstáculos que los objetos de las inmediaciones del aeródromo no podrán sobrepasar.

Dejando claro que para sobrevolar entornos urbanos congestionados un nivel operacional equiparable a performance Clase 1 será necesario para las aeronaves eVTOL, los requisitos que impone el Volumen II del Anexo 14 de OACI en cuanto a superficies limitadoras de obstáculos son demasiado restrictivos para la performance Clase 1. Así, es esperable que dada la redundancia y simplicidad de los multihélices, con unas dimensiones considerablemente más reducidas que en los helicópteros, estas medidas se relajen y se acerquen más a las que actualmente existen para helicópteros con performance Clase 2. En el presente estudio se analizarán ambas opciones, de forma que tengamos una solución más conservadora y otra más optimista en cuanto a los requerimientos que estas superficies limitadoras de obstáculos impondrán a la ubicación final de nuestro vertipuerto en general, y de las FATO en particular.

Por otra parte, pese a que el objetivo final de la UAM es que se realicen vuelos completamente autónomos, con los medios que se disponen actualmente y los programas de desarrollo que se están llevando a cabo, las primeras etapas de aplicaciones como la de aerotaxi se realizarán pilotadas a bordo. Estudiaremos, por tanto, las operaciones mediante VFR, distinguiendo entre dos superficies limitadoras de obstáculos:

superficie de ascenso en el despegue y superficie de aproximación. En particular, pese a que no se ha definido completamente un horario de operación para el vertipuerto, el servicio de aerotaxis también estará disponible en horas nocturnas, y por tanto, habrá que considerar las condiciones NVFR y quedarnos con las variantes nocturnas de estas dos superficies, más restrictivas. Adicionalmente, si se considerara la operación bajo IFR, también habría que considerar las superficie de transición y la superficie cónica.

Las superficies limitadoras de obstáculos a considerar están formadas por una combinación de planos de pendiente ascendente desde la SA y con centro en una línea que pasa por punto central de la FATO.

#### • Superficie de ascenso en el despegue

La superficie de ascenso en el despegue debe garantizar que la maniobra de despegue se pueda realizar de forma segura y que los objetos en las inmediaciones del aeródromo no supongan una limitación a la misma. Está formada por dos tramos: un primer tramo con una divergencia hacia fuera, y un segundo sin divergencia.

El borde interior de la superficie de ascenso en el despegue tendrá una longitud igual al diámetro mínimo de la FATO más el área de seguridad operacional, de forma perpendicular al eje de la superficie y situada en el borde exterior de la SA.

A continuación, los dos bordes laterales presentan una cierta divergencia durante el primer tramo. Esta divergencia será del 10% si el vertipuerto es de uso diurno únicamente, y de un 15% si también tiene un uso nocturno, como será nuestro caso. Esta divergencia se mantendrá hasta que se alcanza un ancho equivalente a  $10D$ , siendo  $D$  la dimensión crítica de nuestra aeronave. A partir de este punto, los bordes serán paralelos y sin divergencia hasta que se alcance una altura de 152 m por encima de la FATO.

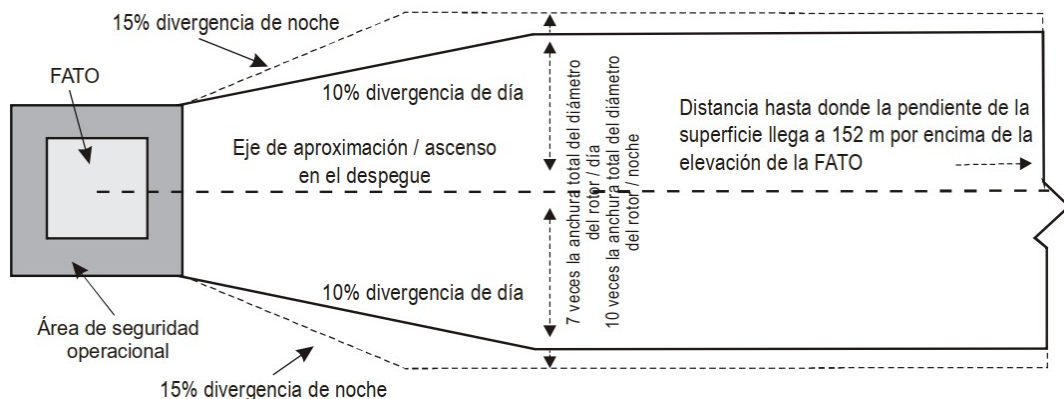


Figura 6.9 Anchura de la superficie de ascenso en el despegue/aproximación.

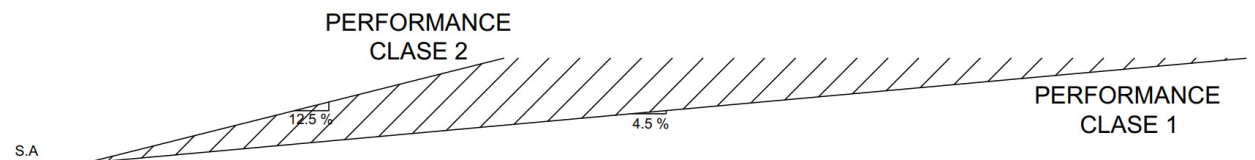


Figura 6.10 Comparativa entre Performance Clase 1 y 2 (eje vertical x10).

Estos parámetros son comunes tanto para performance Clase 1 como performance Clase 2. Ahora bien, mientras que la pendiente de la superficie para performance Clase 1 es de 4.5% y se proyecta una longitud proyectada del borde de la SA de 3386 m, para performance Clase 2 la pendiente es de 12.5% y se proyecta 1220 m del borde de la SA. Por tanto, vemos como según las características de las aeronaves los requisitos presentan gran variación, siendo probable que las aeronaves eVTOL se

encuentren en unos valores intermedios. A continuación se muestra cual sería la superficie de ascenso en el despegue para cada uno de los dos supuestos.

**Tabla 6.13** Superficie de ascenso en el despegue.

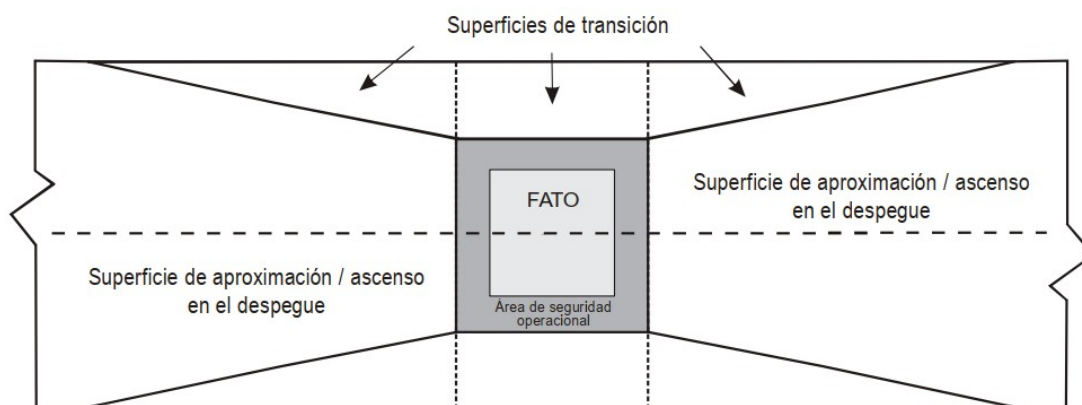
Parámetro	Performance Clase 1		Performance Clase 2	
	1 <sup>er</sup> tramo	2 <sup>o</sup> tramo	1 <sup>er</sup> tramo	2 <sup>o</sup> tramo
Ancho borde interior	22.6 m	113 m	22.6 m	113 m
Longitud del plano	301.3 m	3084.7 m	301.3 m	918.7 m
Alto borde exterior	13.6 m	152 m	37.7 m	152 m
Ancho borde exterior	113 m	113 m	113 m	113 m
Divergencia	15 %	0 %	15 %	0 %
Pendiente	4.5 %	4.5 %	12.5 %	12.5 %

#### • Superficie de aproximación

La superficie de aproximación debe permitir un aterrizaje seguro y libre de obstáculos para las aeronaves. Para VFR, y de acuerdo con las justificaciones anteriores, las dimensiones de la superficie de aproximación son las mismas que las de la superficie de ascenso en el despegue. Por tanto, las superficies limitadoras de obstáculos de nuestro vertipuerto deberán cumplir con lo especificado en la tabla 6.13.

#### • Superficie de transición

Adicionalmente a las superficies de ascenso en el despegue y de aproximación, la normativa heliportuaria establece la necesidad de considerar una superficie de transición en el caso de que el aeródromo tenga una FATO con aproximación PinS que incorpore una superficie de tramo visual (VSS). Esta condición es necesaria si lo extrapolamos a vertipuertos, puesto que las aeronaves eVTOL dispondrán de avanzados sistemas de GPS y guiado que proporcionarán una ayuda instrumental hasta que se tenga un contacto visual con el área de aterrizaje.



**Figura 6.11** Superficie de transición.

Se trata de una superficie compleja que se extenderá a lo largo del borde de la SA y parte del borde de la superficie de ascenso en el despegue/aproximación, con pendiente ascendente y hacia fuera hasta alcanzar una altura de 45 m.

#### 6.3.4 Terminal de pasajeros

Un elemento fundamental del vertipuerto y que no se puede pasar por alto es el edificio terminal, en la medida que se trata del punto de conexión entre lo que es la ciudad y el servicio de taxi aéreo. Por ello, además de

garantizar funcionalidad y la distribución eficaz de los pasajeros, debe tener un componente innovador y que conecte con el ciudadano y los elementos que rodean al vertipuerto. Aunque el objetivo del presente trabajo no es el diseño del edificio terminal, para el cual sería necesario un estudio más específico de la demanda y de teoría de colas, lo que se va a realizar es una definición somera de la superficie necesaria en vistas a poder cuadrar la distribución geométrica final de nuestro vertipuerto.

La terminal de pasajeros de un vertipuerto destinado a la operación de aerotaxis tendrá, fruto de las limitaciones de su ubicación, una superficie reducida que hará necesario darle un enfoque distinto al que podría suceder en una terminal aeroportuaria. En este caso se primará la funcionalidad y ahorro de espacio, y no tanto una visión más comercial con múltiples servicios de restauración. De forma general, el edificio terminal del vertipuerto estará formado por las siguientes estancias:

- Zona de aparcamiento automóviles
- Hall de entrada
- Servicio de información
- Servicio de venta de tickets
- Sala de espera
- Sala de descanso de tripulaciones
- Aseos
- Control de seguridad
- Salas de embarque

Normalmente, cuando se realiza el diseño de un edificio terminal se calcula el número de pasajeros en hora punta (PHP), que hace referencia a la hora de todo el año en la que se acumula un mayor número de pasajeros dentro del edificio, para posteriormente trabajar con el PHD (pasajeros en hora de diseño), un parámetro más realista y que hace referencia a la trigésima hora de mayor punta de tráfico de pasajeros en el edificio. A partir de este valor, y teniendo en cuenta estudios auxiliares como un análisis adecuado de colas, se dimensionan las características funcionales del edificio terminal. Lo cierto es que, dejando estos conceptos aclarados, los objetivos de nuestro proyecto son otros y el diseño del edificio terminal queda fuera del alcance inicial del trabajo. Por tanto, en el presente apartado, además de identificar los elementos de nuestro edificio terminal y explicar el funcionamiento del mismo, se va a realizar un simple ajuste en función del número máximo de operaciones por hora (80 ops/h) para nuestro vertipuerto con 2 FATO.

Los pasajeros entrarían en el edificio terminal por una de las fachadas, en el caso de que el vertipuerto esté dispuesto en superficie, y se encontrarían con un edificio diáfano, a excepción de las salas de descanso y las salas de embarque, de forma que se permitiera ahorrar espacio y aumentar la funcionalidad del complejo. Una vez que se llegara el momento del vuelo, se pasaría el control de seguridad previo a la entrada la sala de embarque, la cual daría un acceso directo al puesto de estacionamiento con la aeronave preparada para el vuelo. Es evidente que el aforo máximo del establecimiento, dadas las limitaciones del servicio que se ofrece y del espacio necesario, estaría limitado y sería de un valor mucho más reducido que las estaciones de otros medios de transporte. De forma genérica, sabiendo que las aeronaves eVTOL ofrecen una capacidad entre 2 y 5 pasajeros por vuelo, la superficie de la sala central diáfana tendría la siguiente superficie:

$$S = 80 \frac{\text{ops.}}{h} \cdot 5 \frac{\text{pax}}{\text{op.}} \cdot 2 \frac{\text{m}^2}{\text{pax}} \cdot 1.2 = 960 \text{m}^2$$

Donde se ha considerado un incremento de un 20% de acuerdo a posibles imprevistos y con el simple objetivo de sobreestimar la superficie que dejemos en nuestra distribución final del vertipuerto destinada al edificio terminal. En proyectos posteriores a este, una vez se han visto todos los requisitos necesarios desde un punto de vista aeronáutico, se debería realizar un detallado estudio de las dimensiones y la distribución de los distintos elementos del edificio terminal. No obstante, no constituye un aspecto tan limitante como podrían ser las superficies puramente aeronáuticas, las cuales necesitan cumplir con unos estándares de seguridad y distancia para el adecuado funcionamiento de las aeronaves. En el caso del edificio terminal, medidas alternativas como la construcción en altura pueden ser una solución para paliar la carestía de espacio en entornos urbanos.



## 6.4 Estimación de potencia

A lo largo del proyecto se ha hecho hincapié en que uno de los objetivos finales del desarrollo de la aplicación de aerotaxis, además de proponer una solución alternativa para el transporte ciudadano a través de una tercera dimensión, es permitir la reducción de la preocupante contaminación atmosférica en entornos urbanos a través del empleo de sistemas de propulsión completamente eléctricos.

Sin embargo, esto lleva asociado importantes restricciones que a día de hoy limitan el alcance de la Movilidad Aérea Urbana mediante estos medios. Por un lado, tal y como se analizó en el apartado 3, la baja energía específica que ofrecen los sistemas de baterías de iones de litio en comparación con los combustibles fósiles tradicionalmente empleados hace que el peso de la aeronave aumente considerablemente y se mantenga constante a lo largo de todo el vuelo, a la vez que limita el rango y la autonomía disponible de la aeronave. Por otro, y quizás lo más relevante desde un punto de vista del diseño de la infraestructura, si queremos garantizar un alto volumen de operaciones en nuestro vertipuerto, una situación que especialmente sucederá en las horas punta del día, una sofisticada instalación eléctrica para la recarga de baterías que contenga los elementos citados en el apartado 4.1.4 debe disponerse.

Esto nos llevará a una adecuada planificación de las operaciones del aeródromo que también sería necesaria empleando sistemas de combustible como el queroseno, pero la principal diferencia radica en que para nuestro caso, el tiempo de carga vendrá limitado por las condiciones de la instalación eléctrica y los avances tecnológicos para la recarga de baterías. En este sentido, y como ya se comentó en el apartado 4.1.4, la carga rápida de baterías permitirá optimizar la eficiencia del vertipuerto y dar mayor agilidad a las operaciones en el mismo, pero a su vez lleva aparejados grandes requerimientos de potencia y un avanzado sistema de gestión y recarga de baterías que no deben ser olvidados. A diferencia de los modos de carga que hasta ahora estábamos acostumbrados en vehículos eléctricos, en los que la carga se producía en corriente alterna, el sistema de carga rápida permite la recarga directamente en corriente continua a través de una serie de transformadores AC/DC en cada puesto de recarga. Por tanto, cada vertipuerto en servicios de taxi aéreo deberá disponer de múltiples puntos de recarga adaptados a las condiciones de carga rápida y que dispongan de una potencia de carga adecuada para optimizar el funcionamiento de la infraestructura. La recarga en nuestro vertipuerto, aunque también se podría llevar a cabo de manera externa y realizar posteriormente un intercambio de baterías, se realizará en el puesto de estacionamiento a través de estos puntos adaptados y que deberán cumplir con lo que a continuación se especifica.

Habiendo analizado los requisitos dimensionales de nuestra aeronave de cálculo, no tendría sentido limitar el diseño de la instalación a los sistemas de baterías actuales, en tanto en cuanto se trata de un sector en continua evolución y en el que se espera que, en los años previos a la entrada en el mercado de estas aeronaves, experimente notables avances que de otra forma dejarían fuera de cobertura a nuestra instalación. De hecho, la mayoría de fabricantes aún no han incorporado datos específicos acerca de los sistemas de baterías que se pretende emplear, lo que es un hecho es que se trata de un problema común cuyo objetivo final es el de permitir reducir el peso y aumentar la autonomía de las aeronaves.

Teniendo en cuenta estos condicionantes, para estimar la potencia necesaria para la recarga de las aeronaves en servicio de taxi aéreo se va a trabajar con unos valores de energía específica alcanzables en el medio plazo, de acuerdo a la figura 3.4, y suponer un tiempo de carga adecuado y deseable para la correcta operación del vertipuerto. Por supuesto, estos parámetros deberían ser analizados con más detalle y realizar estudios específicos en función de las características de la infraestructura y el servicio que queremos prestar, aunque en la presente estimación se consideran valores deseables y que no son nada descabellados de acuerdo con lo comentado a lo largo de todo el proyecto. Asimismo, se deberá considerar un peso para las baterías de acuerdo al tipo de aeronave y la función la aeronave de cálculo de nuestro vertipuerto. En este caso, los multicopteros son aeronaves flexibles y fácilmente adaptables a entornos urbanos, con un peso moderado (a excepción del Airbus CityAirbus no superan los 1000 kg) y unos requerimientos de alcance y autonomía no muy elevados, en la medida que tienen una misión de transporte intraurbano y de conexión entre los distintos puntos de la ciudad, fundamentalmente. Por ello, los sistemas de baterías necesarios no tendrán tanta complejidad como cabría esperar en vuelos interurbanos de largo alcance, habiendo tomado en consideración un peso aproximado de 250 kg para cada sistema de baterías a bordo. El resto de parámetros tenidos en cuenta se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.14 Estimación de potencia requerida.

Parámetro	Valor
Energía específica	350 Wh/kg
Tiempo de carga	10÷15 minutos
Peso baterías	250 kg

$$P = \frac{S \cdot m}{t} = \frac{350 \frac{Wh}{kg} \cdot 200kg}{12.5min} \cdot \frac{60min}{1h} \cdot \frac{1kW}{1000W} = 420kW$$

Así, se necesitarán suministrar aproximadamente 420 kW de potencia en cada puesto de estacionamiento para permitir la carga rápida de baterías dentro de los límites impuestos. Esto nos lleva a que, además de disponer de una instalación adecuada y con cargadores preparados para la carga de alta potencia en cada puesto de estacionamiento, nuestro vertipuerto deberá tener garantizada una adecuada ubicación también en términos de fiabilidad eléctrica. Si realizamos una analogía con respecto a los cargadores más avanzados en el mercado para la recarga de vehículos eléctricos, el cargador V3 Supercharging de Tesla consigue entregar picos de potencia de hasta 250 kW para la recarga de automóviles en apenas 15 minutos. Por tanto, aunque ya se están desarrollando cargadores que se acercan a las exigencias de las aeronaves eVTOL, resulta evidente que avances significativos adaptados a estas aeronaves serán necesarios para convertirlo en un medio de transporte fiable y competitivo.



Figura 6.12 Cargador Tesla V3 Supercharging [89].

Los sistemas de carga actuales hasta 500 kW utilizan un conector CCS de tipo 1 que permite la carga de alta potencia en corriente continua. Cabe esperar que un nuevo sistema de conexión que se ajuste a los niveles de potencia exigidos por las aeronaves eVTOL sea desarrollado en un futuro, pero si nos basamos en los sistemas de carga más avanzados en este momento, será necesario una superficie anexa al puesto de estacionamiento de aproximadamente  $10 m^2$ .

Por otra parte, la cantidad de potencia necesaria para permitir la carga rápida no solo estará asociada a las características individuales de cada aeronave, sino que habrá que tener en cuenta el funcionamiento global del vertipuerto y diseñarlo de modo que en las horas punta del día el funcionamiento sea óptimo. Como norma general, las situaciones de baja demanda en un vertipuerto con una buena ubicación y que permita la

conexión directa con el aeropuerto serán escasas, por lo que deberemos considerar un factor de simultaneidad que permita adaptar la instalación a situaciones donde se produzca la carga simultánea de múltiples aeronaves. Para instalaciones eléctricas aeronáuticas, cuando existan varios puntos de consumo, se recomienda usar un coeficiente de simultaneidad no inferior a 1.5 veces la potencia nominal de cada puesto. Por tanto, para nuestro vertipuerto, con 8 puestos de estacionamiento para aeronaves y 2 FATO, y realizando una estimación más conservadora, será necesaria una potencia para la recarga de aeronaves comprendida entre los 6 y los 8 MW.

## 6.5 Ayudas visuales

Las ayudas visuales de aeródromo tienen el objetivo de facilitar la navegación aérea y las maniobras en tierra de las aeronaves. Durante una primera fase de desarrollo de la Movilidad Aérea Urbana se espera que las operaciones se lleven a cabo pilotadas a bordo y, aunque la carga del piloto se irá reduciendo de forma progresiva, las ayudas visuales necesarias en nuestro vertipuerto podrían ser asimilables a las que el capítulo 5 del Anexo 14 Volumen II de OACI ofrece para el caso de helipuertos destinados a operaciones VFR. Sin embargo, en etapas posteriores, a medida que los avances tecnológicos y regulatorios lo permitan, los vuelos autónomos podrán materializarse en parte gracias a ayudas de tipo instrumental cuya estandarización será un elemento importante en la nueva normativa acerca de vertipuertos. Centrándonos en este crecimiento esperado en el corto y medio plazo mediante operaciones VFR, a continuación se recogen las ayudas visuales indispensables para la correcta operación de las aeronaves: indicadores, señales y balizas, y ayudas luminosas.

### 6.5.1 Indicador de dirección del viento

Tiene la misión de señalar la dirección del viento dominante, a la vez que es una referencia orientativa para conocer la velocidad a la que sopla. Todo vertipuerto estará equipado, al menos, con un indicador de la dirección del viento. OACI recomienda que el indicador esté formado por un cono truncado de tela, de un color que pueda interpretarse claramente a una altura mínima de 200 m sobre el aeródromo y que destaque sobre el fondo. Además, a ser posible se usará un único color, preferiblemente blanco o anaranjado. Para un aeródromo en superficie sus medidas serán:

**Tabla 6.15** Dimensiones indicador dirección de viento.

Longitud	2.4 m
Diámetro (extremo mayor)	0.6 m
Diámetro (extremo menor)	0.3 m



**Figura 6.13** Indicador de dirección del viento.

El indicador de dirección del viento estará situado en un lugar del vertipuerto que indique de forma concisa las condiciones del viento sobre la FATO y la TLOF, de forma que no sufra efectos de perturbaciones de la corriente de aire producida por objetos cercanos o las operaciones de las propias aeronaves. Por tanto, deberá emplazarse en una localización visible tanto en las maniobras de aproximación y de despegue, y además sería recomendable la disposición de más de un cono de viento en nuestro vertipuerto, en la medida que tenemos una configuración de 2 FATO. Por último, el indicador de viento estará iluminado con un foco para facilitar la visión durante las operaciones nocturnas e irá colocado en un mástil en cuya parte superior se dispondrá una luz roja señalizadora de obstáculos.

### 6.5.2 Señal de identificación del vertipuerto

Emplazada en el centro o cerca del centro de la FATO, tendrá la misión de identificar el vertipuerto y distinguirlo del resto de aeródromos que podrían existir en entornos urbanos. La señal consistirá en la letra “V” de color blanco, orientada de modo que su dirección vertical sea perpendicular a la dirección de aproximación más favorable. Esta señal permitirá indicar explícitamente que nuestro aeródromo está adaptado a aeronaves eVTOL y dispone de todos los elementos para la recarga de baterías y la realización de las maniobras de despegue y aproximación para aeronaves de este tipo.

La señal de identificación del vertipuerto tendrá una altura total mínima de 3 m, con una anchura total de no menos de 1.8 m y un ancho de línea de 0.4 m.

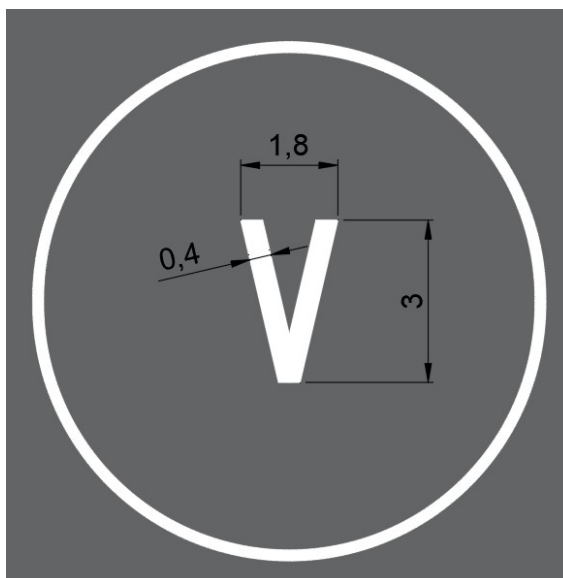


Figura 6.14 Dimensiones mínimas de la señal de identificación del vertipuerto.

### 6.5.3 Señal de área de toma de contacto

La señal de perímetro de área de toma de contacto y de elevación inicial se dispone para delimitar la TLOF cuando su perímetro no resulta obvio. Estará formada por una línea blanca continua de una anchura mínima de 30 cm.

### 6.5.4 Señal de punto de toma de contacto y posicionamiento

Se proporcionará esta señal cuando sea necesaria para que la aeronave efectúe la toma de contacto o para que el piloto la posicione con precisión. Estará situada de manera que, cuando el asiento del piloto esté justo encima de la señal, el tren de aterrizaje completo quede dentro de la TLOF y se mantenga un margen seguro con cualquier obstáculo circundante.

La señal de punto de toma de contacto y posicionamiento estará formada por una circunferencia amarilla con un ancho de línea de al menos 0.5 m y el diámetro interior será de 0.5D, siendo D la aeronave crítica de diseño considerada ( $D=11.3$  m).

### 6.5.5 Señales de puestos de estacionamiento

Deberá disponerse una señal de perímetro de puesto de estacionamiento en aquellos puestos diseñados para poder realizar la maniobra de virajes, de forma que se delimite completamente el área disponible del puesto. Asimismo, se recomienda la existencia de líneas de alineación y líneas de guía para la entrada y salida del puesto.

Tanto la señal de perímetro de puesto de estacionamiento como las líneas de alineación y de entrada y salida serán continuas, de color amarillo y con una anchura de 15 cm.

### 6.5.6 Luces

Tienen la misión de facilitar las operaciones en condiciones de baja visibilidad durante el día o la noche, así como en posibles operaciones nocturnas, permitiendo tener localizado el vertipuerto a una distancia suficiente y siendo de gran utilidad para los pilotos durante la trayectoria de aproximación. Del mismo modo, será necesario disponer de un sistema de señalización lumínico en aquellos objetos que puedan suponer un obstáculo a la correcta operación de las aeronaves.

### 6.5.7 Faro de vertipuerto

Constituye una guía visual de largo alcance cuando esta no se garantiza por otros medios, de modo que permite identificar al aeródromo del resto de elementos existentes en la ciudad. Estará emplazado dentro del vertipuerto o en sus proximidades, en una posición elevada, cuya luz será visible desde todos los ángulos en azimut y de forma que no tenga capacidad de deslumbramiento a los pilotos a corta distancia.

El faro emitirá series de destellos blancos de corta duración de manera repetida y en intervalos iguales de tiempo, tal y como se muestra a continuación:

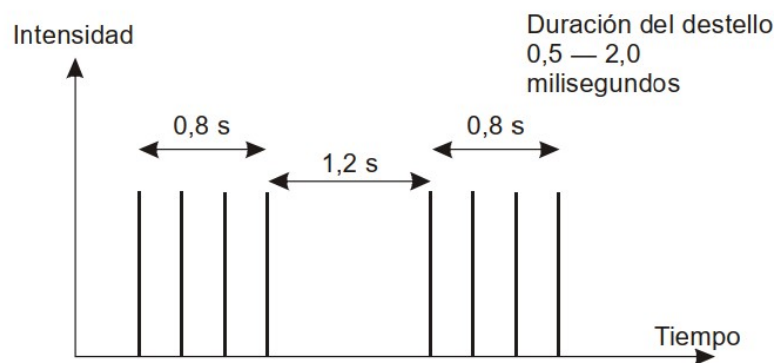


Figura 6.15 Características de los destellos del faro de vertipuerto.

### 6.5.8 Otros sistemas de iluminación

A medida que se vayan produciendo avances tecnológicos y los estándares de seguridad lo permitan, el objetivo tanto de fabricantes como del resto de participantes e inversores en la UAM es ir reduciendo la carga del piloto hasta conseguir realizar vuelos completamente autónomos. Esto no solo permitiría erradicar la principal fuente actual de accidentes, sino que también se conseguiría liberar una plaza en la aeronave y se conseguirían reducir los costes asociados a las tripulaciones. Sin embargo, mientras que el desarrollo de vuelos completamente autónomos en vuelos comerciales se lleva a cabo, el piloto tendrá una misión

de *back-up* en las operaciones. Por tanto, seguirán siendo necesarios sistemas de indicación y guiado que permitan facilitar las maniobras de aproximación y despegue en el vertipuerto. Algunos de estos sistemas son:

- **Sistema de guía de alineación visual**

Permite dar indicaciones visuales acerca del rumbo que sigue la aeronave y las posibles desviaciones que se producen durante la trayectoria de aproximación. Estará situado de manera que permita guiar a la aeronave a lo largo de la derrota estipulada hasta la FATO, evitando así disponer un sistema de iluminación de aproximación, que en entornos urbanos supondría una mayor complejidad.

El sistema, formado por dos unidades luminosas unidireccionales situadas simétricamente a cada lado de la TLOF, estará montado tan bajo como sea posible y sobre soportes frangibles. Así, el piloto irá recibiendo información luminosa en forma de destellos a medida que realiza la operación.

- **Sistema de indicador de pendiente de aproximación**

Proporciona un indicador visual de la pendiente de aproximación, especialmente por la noche, para las trayectorias de aproximación de nuestro vertipuerto, de forma que la aeronave mantenga en todo momento una pendiente preestablecida. Para el caso de helicópteros se emplea el sistema HAPI, consistente en una señal que incluye cuatro posibles sectores de señal según la aeronave se encuentra por encima de la pendiente, en la pendiente, ligeramente por debajo de la pendiente o por debajo de la pendiente. Para aeronaves eVTOL, en la medida en la que se necesita un sistema de iluminación para garantizar que la pendiente de aproximación es correcta, un sistema equivalente será necesario.

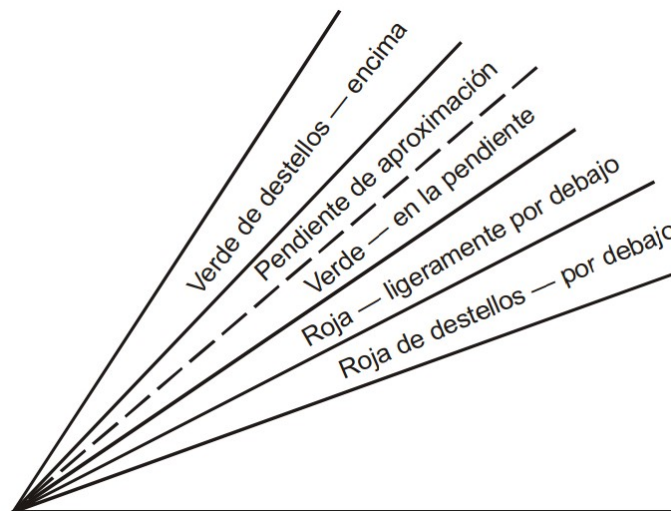


Figura 6.16 Sectores HAPI.

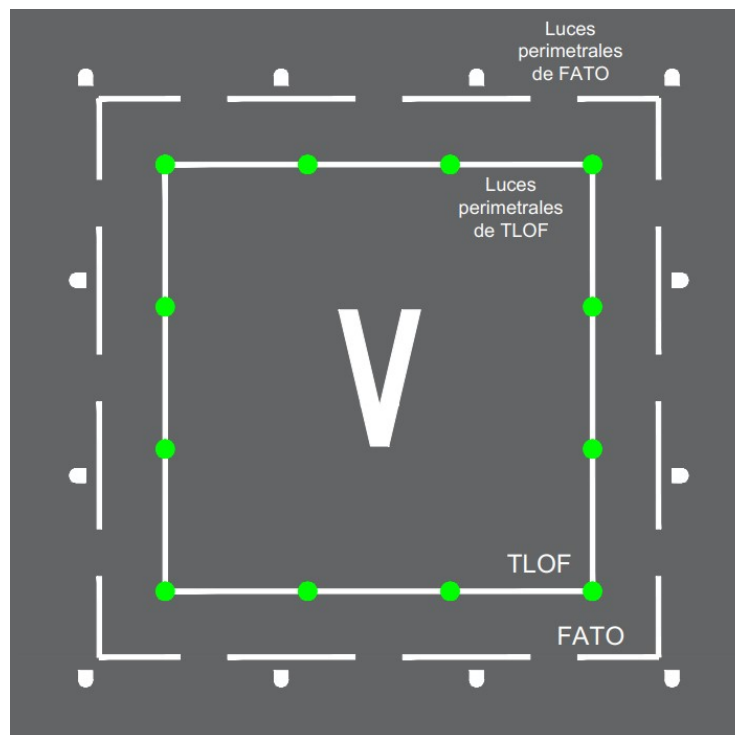
- **Sistema de iluminación de área de aproximación final y de despegue**

Permite la iluminación de la FATO en aeródromos en superficie destinados a operaciones nocturnas. Las luces de FATO se emplazarán a lo largo de los bordes de esta, y separadas uniformemente a intervalos no superiores a 5 m con un mínimo de 10 luces (si la FATO es circular, como sucede en nuestro aeródromo). Se tratarán de luces blancas omnidireccionales, que no excedan una altura de 25 cm sobre el suelo.

- **Sistema de iluminación de área de toma de contacto y elevación inicial**

Al igual que en el caso anterior, si el vertipuerto está destinado a un uso nocturno, se deberá disponer de un sistema de iluminación de TLOF, el cual consistirá en luces de perímetro, reflectores o bien conjuntos de luces puntuales segmentadas o tableros luminiscentes si los dos primeros no son viables.

Las luces de perímetro de TLOF estará emplazadas a lo largo del borde de esta área, o una distancia del borde inferior a 1.5 m. Si la TLOF es un círculo, las luces se colocarán en líneas rectas, de forma que proporcione al piloto una indicación de la deriva, y en caso de no ser posible se emplazarán uniformemente a lo largo del perímetro de la TLOF, pero en un sector de 45° el espaciado se reducirá a la mitad. Serán luces fijas omnidireccionales de color verde, espaciadas a intervalos no superiores a 5 m en aeródromos en superficie.



**Figura 6.17** Luces perimetrales de FATO y TLOF.

## 6.6 Distribución en planta

Una vez han sido definidos todos los parámetros geométricos de nuestra instalación, tanto aeronáuticos como de apoyo al pasajero en tierra, el siguiente paso es establecer una configuración en planta que nos permita optimizar el espacio disponible a la vez que garantice la seguridad operacional de las aeronaves. Obviamente, para acabar de particularizar este planteamiento sería necesario conocer las dimensiones finales de la parcela disponible y un detallado estudio de demanda que nos permitiera saber el número de puestos de estacionamiento y zonas de despegue necesarias, pero dado el alcance académico de este trabajo, se propondrán varias soluciones que tendrán puntos a favor y en contra en función de la localización final elegida.

Pese a que la construcción en superficie presenta un coste menor y a la vez facilitaría el funcionamiento del vertipuerto (tanto en lo referente a la operación de las aeronaves, como al flujo de pasajeros), existen ocasiones en las que la construcción en altura se adecua mejor a las características de nuestro emplazamiento. En el caso de los vertipuertos que den servicio a aplicaciones relacionadas con la Movilidad Aérea Urbana, fruto de las limitaciones de espacio disponible en ciudades y de los exigentes requisitos de obstáculos presentes, esta puede ser una buena solución. Particularmente, sería interesante disponer la FATO sobre una estructura adecuada con capacidad para soportar el peso de las aeronaves, de forma que no solo permitiese reducir el espacio necesario para nuestra instalación, sino que al elevar la zona de despegue, se conseguiría salvar los obstáculos más exigentes. Esta elección estará supeditada a las características de la parcela disponible y los obstáculos del entorno, si bien siempre que sea posible sería más rentable construir en superficie.

Como ya se comentó en el apartado 6.1, en el presente estudio se ha elegido una configuración formada por 8 puestos de estacionamiento y 2 FATO que permitieran operaciones simultáneas, permitiendo realizar aproximadamente 80 operaciones a la hora. Esta elección ha sido arbitraria y con el único fin de implementar un vertipuerto que fuera capaz de soportar el alto volumen de operaciones esperado en una aplicación como esta, si bien es esperable que una infraestructura terrestre con estas características esté generalmente situada a las afueras de la ciudad (realizando las funciones de hub) que en el propio centro. En los centros de ciudad, debido a limitaciones principalmente superficiales los vertipuertos tendrán presumiblemente una única FATO y varios puestos de estacionamiento. No obstante, por el concepto de la aplicación de aerotaxis y al estar trabajando en una ruta intermodal de conexión tren-aeropuerto, nuestro vertipuerto de análisis tendrá una gran demanda, algo que se ha pretendido reflejar usando esta configuración.

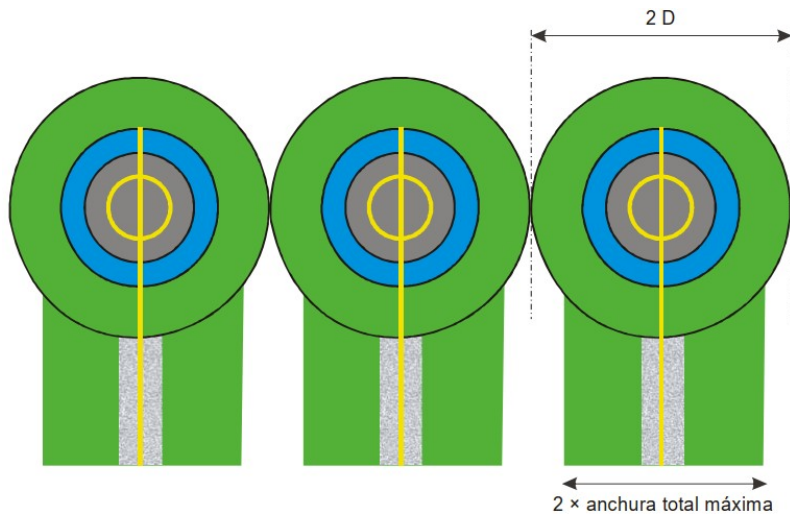
Por otro lado, como ya se expuso en el apartado 4.1.3, sería conveniente destinar parte de la zona de estacionamiento de aeronaves para el diseño de un hangar que permitiera el mantenimiento y reparación de aeronaves cuya puesta a punto antes del vuelo requiera un tratamiento más en detalle. Esto mejoraría en gran medida el servicio prestado por el vertipuerto y su capacidad de respuesta, a la vez que no reduciría la funcionalidad de la instalación, puesto que los hangares permitirían guardar las aeronaves y hacer las veces de un puesto de estacionamiento en su interior. En el presente diseño, tendremos 6 puestos de estacionamiento con sus respectivos puestos de carga y 2 hangares con capacidad para una única aeronave en cada uno de ellos.

Los valores geométricos del área de movimiento se han definido a partir de una aeronave de cálculo obtenida a partir de las dimensiones críticas de los multicópteros actualmente en desarrollo, de forma que la infraestructura no quede obsoleta y esté en servicio el mayor tiempo posible. Para el edificio terminal, se ha estimado la superficie de una sala central diáfana a partir de la cual posteriormente se accedería hacia las distintas salas de embarque, siendo necesaria una superficie para esta sala de aproximadamente  $1000\text{ m}^2$ . Así, teniendo estos valores las dimensiones más restrictivas de la instalación vendrán asociadas al cumplimiento de las áreas de seguridad de las zonas de despegue, a la vez que las calles de rodaje para las aeronaves tengan una disposición que minimice el recorrido y evite cualquier tipo de problema. La zona de seguridad entre los puestos de estacionamiento diseñados para virajes estacionarios y operaciones simultáneas debe ser no menor de  $2D$ , siendo  $D$  la dimensión crítica de la aeronave de cálculo (es decir, la separación mínima entre puestos será de 22.6 m).

Otro factor a considerar es que las trayectorias de despegue y aterrizaje, definidas en las direcciones  $40^\circ$  y  $250^\circ$  según el estudio de vientos del apartado 6.2.2, se puedan realizar correctamente y cumpliendo con las superficies limitadoras de obstáculos también definidas. En cuanto a las trayectorias de aproximación y despegue, esta configuración también permitiría la segregación de operaciones en el vertipuerto, de modo



que mientras una FATO está disponible para operaciones de entrada, la otra está disponible para operaciones de salida, existiendo una ruta de desplazamiento entre ambas. De este modo se podría garantizar la operación segura de las aeronaves durante la trayectoria de aproximación y despegue y una mejor organización del vertipuerto.

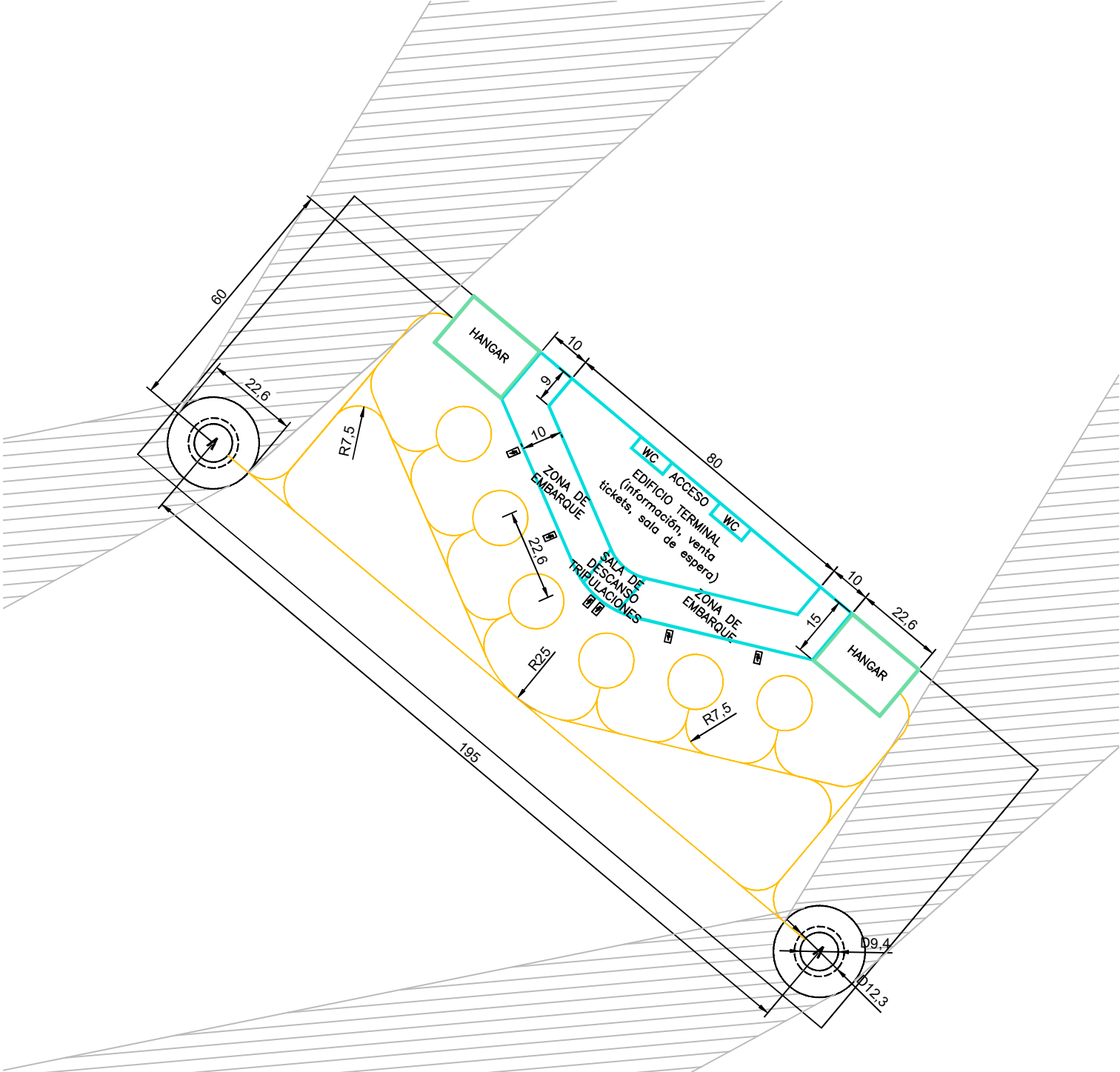


**Figura 6.18** Separación mínima entre los puestos de estacionamiento.

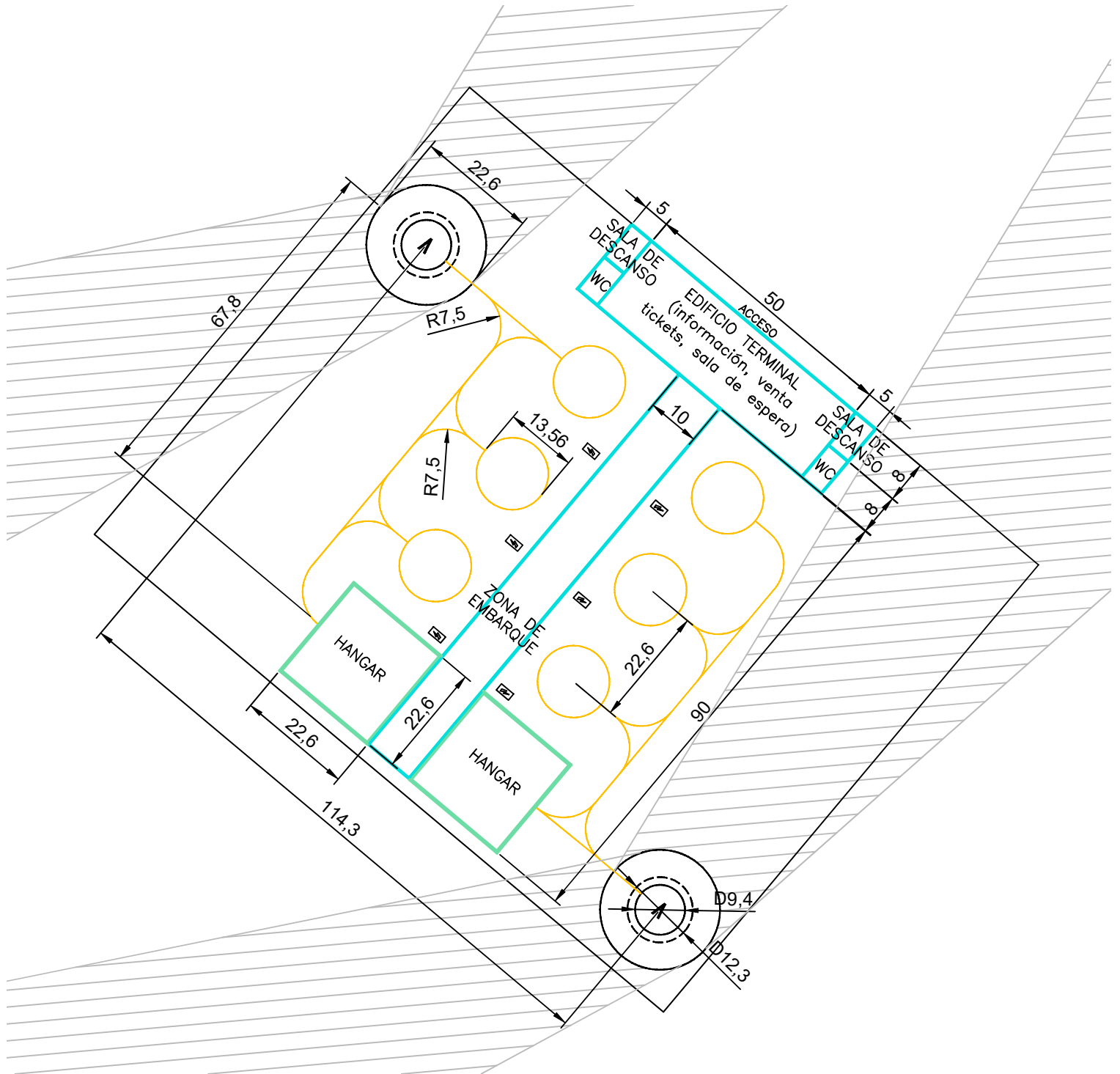
Las tres soluciones planteadas se muestran a continuación, siendo conveniente plantear una u otra en función de las características de la parcela final de nuestro proyecto. Aunque, como se ha especificado anteriormente, la configuración de puestos de estacionamiento y FATO elegida debe realizarse teniendo en cuenta factores como la demanda esperada, las características de la operación prevista en el vertipuerto o las condiciones de entorno disponibles. Con los datos expuestos, sería posible la integración de todos los elementos en una superficie comprendida entre los  $10000 m^2$  y  $15000 m^2$ , valores elevados y difícilmente encontrables en núcleos urbanos masivamente construidos. A medidas que nos alejamos de la zona más céntrica y nos acercamos a las inmediaciones de la estación de Atocha, se ha comprobado que existen parcelas susceptibles de cumplir con las características especificadas.

De los tres planteamientos, la solución 2 es la más compacta y por tanto la que más facilidad de adaptación a un entorno urbano con superficie limitada tendría, aunque la terminal tendría unos recorridos para el pasajero mayores y una funcionalidad menor. La solución 3 presenta una configuración similar, teniendo una terminal de pasajeros más compacta y funcional, pero que afecta al ancho necesario de nuestra parcela. Por último, la solución 1 es la que requiere un área mayor, pero sería adecuada si la parcela tiene una forma más alargada, disponiendo además de una zona terminal con mayores dimensiones.

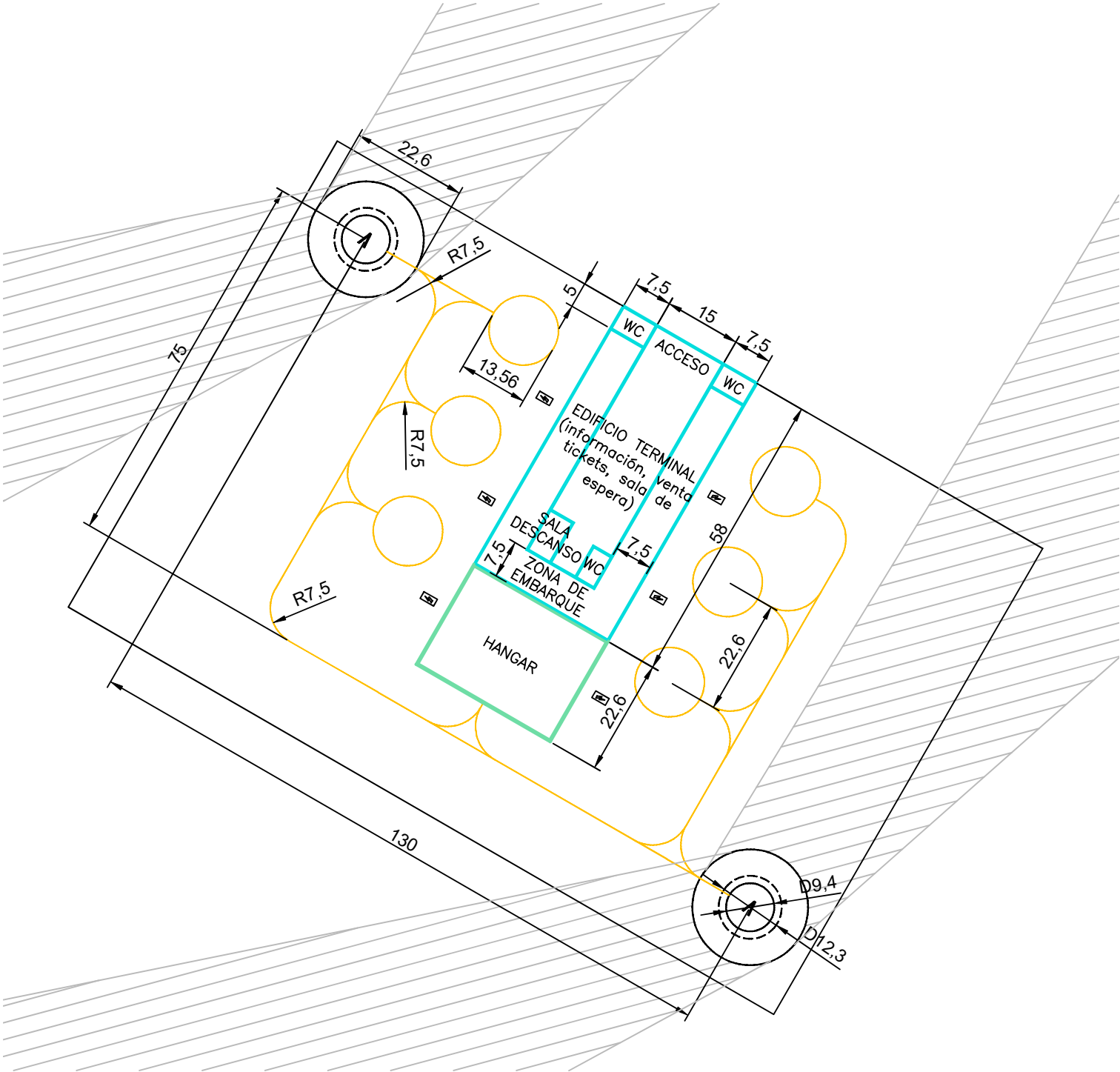
# SOLUCIÓN 1



# SOLUCIÓN 2



# SOLUCIÓN 3



## 7 Conclusión y líneas futuras

---

Cuando hace unos meses elegí la temática sobre la que iba a girar el presente proyecto, sabía que se trataba de una idea innovadora y de futuro, con muchas posibilidades, pero que a su vez este factor novedoso tendría aparejados importantes retos a los que hacer frente. Por tanto, sería importante durante la primera fase del trabajo realizar un estudio acerca de las características de estos vehículos, la tendencia actual y los requisitos que imponen, así como un análisis normativo de las condiciones que rodean a la Movilidad Aérea Urbana en la actualidad, de forma que nos permitiese saber realmente los requerimientos a los que la infraestructura debe hacer frente. Con esto, en una segunda etapa del proyecto se ha pretendido armonizar los requisitos anteriores y realizar un estudio más práctico de las condiciones que debería cumplir la infraestructura.

Sin embargo, fruto de las características del proyecto académico, con una importante carga de búsqueda de información e indagación acerca de este nuevo concepto de movilidad, y con una duración limitada, no se ha profundizado en aspectos constructivos reales acerca de la instalación final. Hubiera sido interesante realizar un dimensionamiento con más detalle de la forma en la que se ajusta la distribución y configuración de nuestro vertipuerto a una parcela existente en la zona elegida, así como un estudio a fondo de todas las instalaciones necesarias para la correcta operación de las aeronaves. Al mismo tiempo, se han encontrado otras limitaciones propias de este nuevo medio de transporte a las que se debe hacer frente en el corto y medio plazo y que se pasan a comentar a continuación.

La primera limitación es tecnológica y hace referencia a las aeronaves, especialmente en términos de alimentación eléctrica. Para que estas aeronaves puedan tener un uso flexible y no condicionen la ubicación final de cada vertipuerto y sus aplicaciones, una fuente de alimentación eléctrica que tenga una energía específica más cercana a la que presentan los combustibles fósiles hasta ahora empleados es necesaria. Este hecho no solo reduce considerablemente la autonomía de la aeronave y su rango de acción, sino que aumenta el peso de la aeronave y disminuye su funcionalidad. Adicionalmente, el siguiente reto que se plantea es el de conseguir realizar vuelos de pasajeros completamente autónomos de manera regular, algo que repercutirá no solo repercutirá económicamente, sino que también permitirá liberar una plaza adicional para nada despreciable en estos vehículos de pequeño tamaño. Por ello, es necesario que en los años venideros se desarrollen sistemas avanzados para la operación autónoma y un sistema de comunicación robusto que permita la integración en el espacio aéreo de múltiples vuelos autónomos de forma simultánea.

La segunda limitación es desde un punto de vista regulatorio, tanto para el diseño y fabricación de aeronaves como para la propia infraestructura y su adaptación al entorno existente. En particular, nos enfocamos en esta última, puesto que no existe actualmente una normativa de referencia específica acerca de vertipuertos y una adaptación de la legislación existente es necesaria para el desarrollo de los proyectos que emergen con fuerza. Como hemos visto a lo largo del trabajo, por características y entorno de operación la asimilación de la normativa heliportuaria para estas aeronaves puede tener un resultado favorable en muchos aspectos, pero existen otros elementos como las superficies limitadoras de obstáculos que requerirán un estudio más específico adaptado a las características de unas aeronaves de menor tamaño y peso, con una gran redundancia y mayor estabilidad, como son las eVTOL. En este estudio, tras analizar las características de las aeronaves eVTOL, se ha tratado de extrapolar el Anexo 14 Volumen II de OACI sobre helipuertos, si bien tal y como se indica en líneas superiores, este sobreestima muchos elementos de la infraestructura y es necesario realizar

un tratamiento específico en aquellos puntos en los que estas aeronaves se alejan de los helicópteros. La normativa actualmente en desarrollo, por tanto, deberá tener un tratamiento específico y estandarizado de elementos como la instalación eléctrica que permita la carga rápida de baterías a alta potencia o las superficies limitadoras de obstáculos impuestas a estas aeronaves.

La tercera limitación, y quizá la más evidente, es propiamente la asociada a la infraestructura terrestre necesaria para dar cobertura a los vuelos en entornos urbanos, donde la superficie disponible es muy limitada, el precio de adquisición es elevado y existen condiciones muy restrictivas de obstáculos en las inmediaciones del vertipuerto que deben salvarse para proporcionar una trayectoria de despegue y aproximación óptima. Además, se deben hacer frente a otros desafíos alternativos como pueden ser la gran demanda de potencia requerida y una conexión fiable a la red eléctrica, que influirá en la ubicación final del vertipuerto, o conseguir el beneplácito de las comunidades vecinas donde los efectos acústicos y visuales podrían suponer un problema.

En cualquier caso, se ha pretendido analizar todos los factores a considerar para que la operación en entornos urbanos sea posible, proporcionando una guía de los requisitos que la infraestructura terrestre debería cumplir y como explotarlos. En proyectos posteriores, y siguiendo con este novedoso concepto que ofrece grandes posibilidades, quedan aún por definir distintos rasgos de lo que será la operación de estas aeronaves y su integración en las ciudades como un medio de transporte alternativo. Como posibles líneas futuras al presente trabajo, se ofrece:

- Estudio detallado de los sistemas de almacenamiento eléctricos en desarrollo, de forma que se pueda definir por completo la instalación eléctrica necesaria para la carga rápida y gestión eficaz de las aeronaves en tierra.
- Regulación del espacio aéreo y de cómo sería la integración de estas aeronaves con los vuelos ya existentes (presumiblemente a una altura menor).
- Estudio de mercado de las operaciones de este medio de transporte y la ubicación óptima de este nuevo concepto de aeródromo.
- Análisis de los aspectos constructivos de detalle, eligiendo una localización que cumpla con las superficies limitadoras de obstáculos, sea accesible y en un lugar estratégico dentro del mapa urbano, de forma que se pueda culminar la indagación llevada a cabo en este proyecto (diseño de pavimento, edificio terminal, instalación eléctrica...).

Lo que está claro es que el concepto de Movilidad Aérea Urbana ha venido para quedarse, abriéndose un campo nuevo en el que nuestro objetivo como ingenieros será que su adaptación a las ciudades que conocemos hoy en día sea óptima y pueda convertirse en un medio de transporte seguro y eficiente.

# Bibliografía

---

- [1] Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo | ONU DAES | Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (2018). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- [2] Población urbana (% del total) | Data. (2019). Retrieved 1 April 2021, from <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>
- [3] EIT Urban Mobility. (2021). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.eiturbanmobility.eu/>
- [4] Daily, M. (2018). More than 20% of Europeans Commute at Least 90 Minutes Daily. Retrieved 6 May 2021, from <https://www.sdworx.com/en/press/2018/2018-09-20-more-than-20percent-of-europeans-commute-at-least-90-minutes-daily>
- [5] Tom Tom Traffic Index. (2021). Retrieved 27 March 2021, from [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/ranking/](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/)
- [6] Transporte urbano en España, el impacto nocivo supone un coste económico del 2% sobre el PIB - Retail Actual. (2020). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.retailactual.com/noticias/20200707/informe-distribucion-logistica-ciudades-aecoc#.YGW5oa8zZPa>
- [7] Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. (2018). Retrieved 1 April 2021, from [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [8] Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). Contaminación atmosférica(2020). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.eea.europa.eu/es/themes/air/intro>
- [9] La contaminación ambiental causa en España 31.600 muertes prematuras. (2020). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.redaccionmedica.com/secciones/neumologia/contaminacion-ambiental-espana-31-600-muertes-prematuras-7463>
- [10] ISGlobal - Planificación urbana, medio ambiente y salud. (2020). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.isglobal.org/urban-planning>
- [11] El País, E. (2020). La Comisión Europea lanza un plan para reducir un 90% el CO2 del transporte para 2050. Retrieved 1 April 2021, from <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2020-12-09/la-comision-europea-lanza-un-plan-para-reducir-un-90-el-co2-del-transporte-para-2050.html>
- [12] El Gobierno aprueba 57 medidas para cumplir con los objetivos de reducción de la contaminación que marca la UE • ESMARTCITY. (2019). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.esmartcity.es/2019/10/01/gobierno-aprueba-57-medidas-cumplir-objetivos-reduccion-contaminacion-marca-ue>
- [13] eVTOL Aircraft Directory. (2021). Retrieved 1 April 2021, from <https://evtol.news/aircraft>
- [14] Altran. (2020). En Route to Urban Air Mobility [Ebook] (1st ed.). Retrieved from <https://www.altran.com/as-content/uploads/sites/27/2020/03/en-route-to-urban-air-mobility.pdf>

- [15] Booz Allen Hamilton. (2018). Urban Air Mobility (UAM) Market Study. (2018). [Ebook]. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190001472>
- [16] DHL incorporará drones en sus plantas logísticas de España - Noticias Infodron.es. (2020). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.infodron.es/id/2020/06/19/noticia-incorporara-drones-plantas-logisticas-espana.html>
- [17] Multicopter in the rescue service. (2021). [Ebook] (1st ed.). Munich. Retrieved from [https://luftrettung.adac.de/app/uploads/2021/02/LRG\\_Machbarkeitsstudie\\_engl.pdf](https://luftrettung.adac.de/app/uploads/2021/02/LRG_Machbarkeitsstudie_engl.pdf)
- [18] El Comité EASA da luz verde al Reglamento Europeo U-Space para drones | AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea - Ministerio de Fomento. (2021). Retrieved 1 April 2021, from <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/noticias/el-comit%C3%A9-easa-da-luz-verde-al-reglamento-europeo-u-space-para-drones>
- [19] EHang. (2020). White Paper on Urban Air Mobility Systems [Ebook]. Retrieved from <https://www.ehang.com/app/en/EHang%20White%20Paper%20on%20Urban%20Air%20Mobility%20Systems.pdf>
- [20] Las operaciones con drones en el espacio aéreo español aumentaron un 207% en el último año. (2021). Retrieved 8 May 2021, from <https://actualidad aeroespacial.com/las-operaciones-con-drones-en-el-espacio-aereo-espanol-aumentaron-un-207-en-el-ultimo-ano/>
- [21] Europa pone a prueba el futuro de la movilidad aérea urbana con el proyecto AMU-LED. (2021). Retrieved 1 April 2021, from <https://actualidad aeroespacial.com/europa-pone-a-prueba-el-futuro-de-la-movilidad-aerea-urbana-con-el-proyecto-amu-led/>
- [22] VTOL - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://es.wikipedia.org/wiki/VTOL>
- [23] Harrier - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://es.wikipedia.org/wiki/Harrier>
- [24] The History Of Personal VTOL Technology | JetPack Aviation. (2020). Retrieved 6 May 2021, from <https://jetpackaviation.com/history-of-personal-vtol-technology/>
- [25] EAA. (2017). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.eaa.org/eaamuseum/museum-collection/aircraft-collection-folder/1949-taylor-aerocar—n4994p>
- [26] Salisbury, L. (2008). Volante (Ford) VTOL. Retrieved 6 May 2021, from [https://www.roadabletimes.com/roadables-vtol\\_volanteFord.html](https://www.roadabletimes.com/roadables-vtol_volanteFord.html)
- [27] Werth, E. (2018). Así era el jeep volador que fabricó el Ejército de los Estados Unidos para usar en combate. Retrieved 6 May 2021, from <https://es.gizmodo.com/asi-era-el-jeep-volador-que-fabrico-el-ejercito-de-los-1829103500>
- [28] Organización de Aviación Civil Internacional, OACI. (2015). Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) (ISBN 978-92-9231-809-3)
- [29] Organización de Aviación Civil Internacional, OACI. (2015). Manual sobre sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) (ISBN 978-92-9249-742-2)
- [30] Organización de Aviación Civil Internacional, OACI.(2013). Anexo 1, Licencias al personal (ISBN 978-92-9231-831-4 )
- [31] Agencia Europea de Seguridad Aérea. (2019). Special Condition for Small-Category VTOL Aircraft, SC-VTOL. Retrieved 6 May 2021, from <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01.pdf>
- [32] EASA takes the first shot at eVTOL regulations. Did they miss the mark? - evtol.com. (2019). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.com/opinions/easa-first-shot-evtol-regulations/>
- [33] Porsche Consulting. (2018). The Future of Vertical Mobility [Ebook]. Retrieved from <https://www.porsche-consulting.com/en/press/insights/detail/study-the-future-of-vertical-mobility/>



- [34] Hepperle, M. (2012). *Electric Flight-Potential and Limitations* [Ebook]. Braunschweig, Alemania. Retrieved from <https://elib.dlr.de/78726/1/MP-AVT-209-09.pdf>
- [35] Pila de combustible - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Retrieved 6 May 2021, from [https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_de\\_combustible](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible)
- [36] Joby Aviation. (2020). *Noise Comparison of Aerospace Vehicles* [Ebook]. Retrieved from [https://evtol.news/\\_\\_media/PDFs/3-GOLDMAN-Joby-eVTOLAcoustics-HeliExpo2020.pdf](https://evtol.news/__media/PDFs/3-GOLDMAN-Joby-eVTOLAcoustics-HeliExpo2020.pdf)
- [37] NIA-NASA Urban Air Mobility Electrical Infrastructure Study. (2018). *Powered for Take Off*. [Ebook]. Retrieved from [https://www.bv.com/sites/default/files/2019-11/NASA\\_eVTOL\\_Electric\\_Infrastructure\\_Study.pdf](https://www.bv.com/sites/default/files/2019-11/NASA_eVTOL_Electric_Infrastructure_Study.pdf)
- [38] Uber Elevate. (2016). *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation* [Ebook]. Retrieved from <https://www.uber.com/elevate.pdf>
- [39] iMOV3D. (2021). *Jornada sobre el Futuro de la Movilidad Aérea Avanzada* [webinar].
- [40] Coches, M. (2020). *Taxis voladores: los drones de transporte que serán parte de la movilidad*. Retrieved 6 May 2021, from <https://www.marca.com/coches-y-motos/tecnologia/2020/02/28/5e590503e2704ee5448b464a.html>
- [41] EHang 216. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.news/ehang-216/>
- [42] Volocopter VoloCity. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.news/volocopter-velocity>
- [43] Airbus CityAirbus. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.news/airbus-helicopters/>
- [44] Wisk (Kitty Hawk) Cora. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.news/kitty-hawk-cora/>
- [45] Lilium Jet. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.news/lilium/>
- [46] Notice, L., Policy, P., & Recruiting, P. (2021). *Lilium Jet - Lilium*. Retrieved 6 May 2021, from <https://lilium.com/jet>
- [47] Joby S4. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.news/joby-s4>
- [48] KPMG. (2021). *Aviation 2030. Disruption beyond COVID-19* [Ebook]. Retrieved from <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/10/aviation-2030-sequel.html>
- [49] Enaire saca a concurso el desarrollo de su plataforma U-Space. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://actualidad aeroespacial.com/enaire-saca-a-concurso-el-desarrollo-de-su-plataforma-u-space/>
- [50] Organización de Aviación Civil Internacional, OACI. (2013). *Anexo 14, Aeródromos- Volumen II, Helipuertos* (ISBN 978-92-9249-294-6)
- [51] Lilium welcomes Baillie Gifford as new investor, e., Notice, L., Policy, P., & Recruiting, P. (2021). *Designing a scalable vertiport - Lilium*. Retrieved 6 May 2021, from <https://lilium.com/newsroom-detail/designing-a-scalable-vertiport>
- [52] VoloCity – the urban air taxi by Volocopter. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.volocopter.com/solutions/velocity/>
- [53] Callejo, A. (2019). *¿Es la carga rápida perjudicial para un coche eléctrico?* | forococheselectricos. Retrieved 6 May 2021, from <https://forococheselectricos.com/2019/09/es-la-carga-rapida-perjudicial-para-un-coche-electrico.html>
- [54] Deloitte Insights. (2019). *Infrastructure barriers to the elevated future of mobility* [Ebook]. Retrieved from [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/5103\\_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM/DI\\_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/5103_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM/DI_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM.pdf)
- [55] *Regulatory framework to accommodate unmanned aircraft systems in the European aviation system* | EASA. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.easa.europa.eu/document-library/rulemaking-subjects/regulatory-framework-accommodate-unmanned-aircraft-systems>

- [56] Vertiport regulations and standards: Creating the rules framework for UAM infrastructure - Skyports. (2020). Retrieved 6 May 2021, from <https://skyports.net/2020/07/vertiport-regulations-and-standards-creating-the-rules-framework-for-uam-infrastructure/>
- [57] Working Groups - Eurocae. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://eurocae.net/about-us/working-groups/>
- [58] WK59317 New Specification for Vertiport Design. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK59317.htm>
- [59] Fernández, J. (2019). Así cree Volocopter que serán las estaciones de aerotaxis ¿del futuro?. Retrieved 6 May 2021, from [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2019/10/21/motor/1571661335\\_775461.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2019/10/21/motor/1571661335_775461.html)
- [60] Why urban air mobility projects are skyrocketing. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.flightglobal.com/flight-international/why-urban-air-mobility-projects-are-skyrocketing/143392.article>
- [61] VoloPort - Skyports. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://skyports.net/projects/volo-port/>
- [62] De ser la fábrica de Occidente a un líder de innovación: Asia hará de este su siglo gracias a las 4 "M". (2020). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.economista.es/economia/noticias/10917530/11/20/De-ser-la-fabrica-de-Occidente-a-un-lider-de-innovacion-Asia-hara-de-este-su-siglo-gracias-a-las-4-M.html>
- [63] EHang announces plans to build 'E-port' for aerial tourism - evtol.com. (2020). Retrieved 6 May 2021, from <https://evtol.com/news/ehang-eport-aerial-tourism/>
- [64] Chinese air-taxi company EHang aims to build first European vertiport in Italy - News - GCR. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.globalconstructionreview.com/news/chinese-air-taxi-company-ehang-aims-build-first-eu/>
- [65] EHang to build world's first e-port in China. (2020). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.smartcitiesworld.net/news/news/ehang-to-build-worlds-first-e-port-in-china-5219>
- [66] Air-One, el primer centro dedicado a transporte eléctrico urbano aéreo. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://movilidadelectrica.com/urban-air-port-centro-para-aeronaves-evtol/>
- [67] Gorgan, E. (2021). Hyundai Unveils World's First Urban Air Port, Set to Open in 2021. Retrieved 6 May 2021, from <https://www.autoevolution.com/news/hyundai-unveils-worlds-first-urban-air-port-set-to-open-in-2021-155266.html>
- [68] Reino Unido establecerá el primer Urban Air Port del mundo en Coventry - Noticias Infodron.es. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://www.infodron.es/id/2021/02/03/noticia-reino-unido-establecera-primer-urban-mundo-coventry.html>
- [69] Ferrovial inicia un proyecto para desarrollar más de 20 vertipuertos sostenibles en España. (2021). Retrieved 6 May 2021, from <https://newsroom.ferrovial.com/es/noticias/ferrovial-espana-vertipuertos-sostenible/>
- [70] Magariño, J. (2021). Ferrovial construirá una decena de 'vertipuertos' en Florida para 'jets' de despegue vertical. Retrieved 6 May 2021, from [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/01/27/companias/1611766845\\_894964.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/01/27/companias/1611766845_894964.html)
- [71] 200 millones para taxis voladores con fondos covid. ¿Necesita España 20 vertipuertos?. (2021). Retrieved 6 May 2021, from [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2021-04-09/vertipuertos-ferrovial-lilium-ehang-volocopter-joby-aviation\\_3006748/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2021-04-09/vertipuertos-ferrovial-lilium-ehang-volocopter-joby-aviation_3006748/)
- [72] Ferrovial busca introducir los taxis voladores en España con el Fondo de Recuperación. (2021). Retrieved 6 May 2021, from [https://www.elconfidencial.com/empresas/2021-02-08/ferrovial-introducir-taxis-voladores-espana-vertipuertos\\_2941639/](https://www.elconfidencial.com/empresas/2021-02-08/ferrovial-introducir-taxis-voladores-espana-vertipuertos_2941639/)
- [73] EHang. (2020). White Paper on Urban Air Mobility Systems [Ebook]. Retrieved from <https://www.ehang.com/app/en/EHang%20White%20Paper%20on%20Urban%20Air%20Mobility%20Systems.pdf>

- [74] Las operaciones con drones en el espacio aéreo español aumentaron un 207 % en el último año. (2021). Retrieved 8 May 2021, from <https://actualidad aeroespacial.com/las-operaciones-con-drones-en-el-espacio-aereo-espanol-aumentaron-un-207-en-el-ultimo-ano/>
- [75] VoloDrone – next level logistics. (2021). Retrieved 1 June 2021, from <https://www.volocopter.com/solutions/volodrone/>
- [76] (2019). Retrieved 1 June 2021, from <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>
- [77] Block, I. (2020). Google's Wing drones deliver essentials during coronavirus pandemic. Retrieved 15 May 2021, from <https://www.dezeen.com/2020/04/15/google-wing-drone-delivery-coronavirus-virginia/>
- [78] Murison, M. (2019). DHL and EHang Partner on Urban Drone Delivery in China. Retrieved 15 May 2021, from <https://dronelife.com/2019/05/30/dhl-and-ehang-partner-on-urban-drone-delivery-in-china/>
- [79] DHL y EHang lanzan el primer servicio de entrega de drones automatizado en China | DPLNews. (2019). Retrieved 15 May 2021, from <https://digitalpolicylaw.com/dhl-y-ehang-lanzan-el-primer-servicio-de-entrega-de-drones-automatizado-en-china/>
- [80] Drone Package Delivery Global Market Report 2021: COVID-19 Growth And Change. (2021). Retrieved 15 May 2021, from <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/03/08/2188710/0/en/Drone-Package-Delivery-Global-Market-Report-2021-COVID-19-Growth-And-Change.html>
- [81] European Union Aviation Safety Agency. (2021). Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe [Ebook] (1st ed.). Retrieved from <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf>
- [82] Deloitte. (2020). Logística de Última Milla. Retos y soluciones en España [Ebook]. Retrieved from <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/es/Documents/operaciones/Deloitte-es-operaciones-last-mile.pdf>
- [83] StoreDot recarga un dron en cinco minutos con su sistema de carga ultra rápida FlashBattery. (2020). Retrieved 1 June 2021, from <https://elperiodicodelaenergia.com/storedot-recarga-un-dron-en-cinco-minutos-con-su-sistema-de-carga-ultra-rapida-flashbattery/>
- [84] Electric Vertical HEMS: A New Era in Air Ambulance?. (2021). Retrieved 15 May 2021, from <https://evtol.news/news/electric-vertical-hems-a-new-era-in-air-ambulance>
- [85] Baumann, U. (2020). ADAC reserviert Volocopter: Luftrettung kommt künftig auch elektrisch. Retrieved 1 June 2021, from <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/adac-volocopter-luftrettung/>
- [86] NASA UAM. (2018). Urban Air Mobility (UAM) Market Study [Ebook]. Retrieved from <https://docplayer.net/162724409-Urban-air-mobility-uam-market-study.html>
- [87] AEMET (2021). AEMET OpenData - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. Retrieved 5 June 2021, from [http://www.aemet.es/es/datos\\_abiertos/AEMET\\_OpenData](http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_OpenData)
- [88] Plan Director del aeropuerto de Madrid-Barajas. (1999). [Ebook]. Retrieved from [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/pdf/93BBDA16-BDB3-444D-9B25-934B0D48C3E8/54809/Aprobacion.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/pdf/93BBDA16-BDB3-444D-9B25-934B0D48C3E8/54809/Aprobacion.pdf)
- [89] Galán, D. (2021). Tesla abre el primer Supercargador V3 en España, capaz de recargar hasta 120 km de autonomía en cinco minutos. Retrieved 23 June 2021, from <https://www.motorpasion.com/tesla/tesla-abre-primer-supercargador-v3-espana-capaz-recargar-120-km-autonomia-cinco-minutos>

