



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Implementación de un Vertipuerto para operaciones eVTOL  
en Valencia: Dimensionamiento de la infraestructura  
necesaria y desarrollo del caso de negocio para servicios  
de taxi aéreo

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Llamazares Alvarez, Javier

Tutor/a: Gallego Salguero, Áurea Cecilia

Cotutor/a: Quintanilla García, Israel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



# Agradecimientos

*A mis profesores y tutores, por su inspiración y paciencia.*

*A mis compañeros, por el irreplicable camino compartido.*

*A mi familia, por vuestro apoyo incondicional.*

*Por este camino, en ocasiones infinito, que solo ha resultado ser el primer paso de muchos.*





# Abstract

En la creciente industria de la movilidad aérea urbana, las aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) representan una prometedora solución para los desafíos de la movilidad en las ciudades. Este estudio se adentra en este contexto emergente planteando dos objetivos fundamentales: la implementación de un vertipuerto para operaciones eVTOL y la configuración de un caso de negocio para servicios de taxi aéreo en Valencia.

Ambas perspectivas, si bien interrelacionadas, poseen peculiaridades que justifican su estudio individual y detallado, lo que permitirá una comprensión más clara del panorama global y los desafíos inherentes a este innovador concepto de movilidad.

La primera parte del proyecto se centra en el dimensionamiento del vertipuerto. Por un lado, se realiza un análisis de las diferentes configuraciones posibles para el diseño del lado aire de la infraestructura, así como de los elementos y servicios que deben componer las instalaciones. Por otra parte, se lleva a cabo el planteamiento técnico para su implementación, desde la selección del emplazamiento objetivo hasta el dimensionamiento de la infraestructura, definiendo las áreas requeridas como las plataformas de despegue y aterrizaje, áreas de estacionamiento y superficies limitadoras de obstáculos. Para finalizar, se determinan las ayudas visuales y los sistemas de iluminación necesarios para la operación segura del vertipuerto.

La segunda sección del proyecto se centra en el desarrollo del caso de negocio para un operador de servicio de taxi aéreo en Valencia. A través de la consideración de rutas potenciales y la demanda del mercado, este estudio provee una estimación de los costes asociados de este servicio para determinar el potencial económico del servicio de taxi aéreo, proporcionando un estudio detallado sobre el concepto de operación y gestión de la flota desde el punto de vista del operador.

Finalmente, este proyecto profundiza en uno de los retos más significativos que enfrenta la industria eVTOL: el sistema de almacenamiento energético de las aeronaves. Para ello, se realiza una evaluación de las diferentes tecnologías existentes, estudiando las posibilidades y limitaciones que presentan para su explotación en actividades comerciales de movilidad aérea.

El proyecto culmina con la presentación de conclusiones y recomendaciones, que buscan proporcionar una guía práctica para la implementación exitosa de un vertipuerto y de un servicio de taxi aéreo en Valencia. En su totalidad, este trabajo ofrece una visión integral y detallada de cómo podría establecerse un servicio de taxi aéreo eVTOL en Valencia, abordando tanto las oportunidades como los desafíos que la movilidad aérea urbana presenta en la actualidad.

## Palabras Clave

Vertipuerto, eVTOL, movilidad aérea urbana, UAM, taxi aéreo, lado aire, infraestructura, TLOF, FATO, superficies limitadoras de obstáculos, OLS, caso de negocio, operador aéreo, modelo de negocio.



# Índice general

Glosario y Acrónimos . . . . .	15
Lista de Unidades . . . . .	19
<b>1. Introducción</b>	<b>21</b>
1.1. Motivación del estudio. . . . .	21
1.2. Objetivos del proyecto. . . . .	22
1.3. Metodología. . . . .	22
<b>2. Estado del arte</b>	<b>25</b>
2.1. Descarbonización del transporte urbano. . . . .	25
2.2. Congestión de las áreas metropolitanas. . . . .	26
2.3. Soluciones industriales y tecnologías emergentes. . . . .	28
<b>3. Movilidad aérea urbana</b>	<b>31</b>
3.1. Evolución histórica y antecedentes. . . . .	31
3.2. Mercados UAM. . . . .	33
3.3. Definición y tamaño de mercado. . . . .	34
3.4. Desafíos de la movilidad aérea urbana. . . . .	35
3.4.1. Desafíos tecnológicos. . . . .	35
3.4.2. Desafíos de infraestructura terrestre. . . . .	36
3.4.3. Desafíos normativos y regulatorios. . . . .	36
3.4.4. Desafíos sociales y adopción de la tecnología. . . . .	37
<b>4. Aeronaves eVTOL</b>	<b>39</b>
4.1. Definición y concepto eVTOL. . . . .	39
4.2. Tipologías y configuración de eVTOLs . . . . .	40
4.2.1. eVTOLs sin ala (Wingless eVTOLs) . . . . .	41
4.2.2. eVTOLs con alas (Powered Lift eVTOLs) . . . . .	41
4.2.3. Características y ventajas de las configuraciones eVTOL . . . . .	42
4.3. Propuestas y conceptos eVTOL. . . . .	44
4.3.1. Lilium Jet. . . . .	44
4.3.2. Joby Aviation. . . . .	44
4.3.3. Wisk Aero. . . . .	45
4.3.4. Dufour Aerospace. . . . .	46
4.3.5. Volocopter. . . . .	47
4.3.6. Vertical Aerospace. . . . .	48
4.3.7. eHang. . . . .	49
<b>5. Estimación de la demanda</b>	<b>51</b>
5.1. Definición de los tipos de misión. . . . .	51
5.1.1. Misión de corto radio. . . . .	51
5.1.2. Medio y largo alcance. . . . .	52
5.2. Identificación de localizaciones potenciales. . . . .	53
5.2.1. Análisis de las localizaciones propuestas. . . . .	53
5.2.2. Selección de la ubicación objetivo. . . . .	54

5.3.	Análisis de la movilidad urbana y demografía en Valencia. . . . .	55
5.3.1.	Análisis demográfico. . . . .	55
5.3.2.	Movilidad urbana en Valencia. . . . .	57
5.4.	Comparación de los tiempos de trayecto. . . . .	62
5.4.1.	Análisis comparativo para el perfil de misión commuting. . . . .	62
5.4.2.	Análisis comparativo para el perfil de misión Airport shuttle. . . . .	64
5.4.3.	Análisis comparativo para los perfiles de misión medio y largo alcance. . . . .	64
5.5.	Estimación de la demanda como parámetro de diseño. . . . .	65
<b>6.</b>	<b>Selección y estudio del emplazamiento</b>	<b>69</b>
6.1.	Emplazamiento del vertipuerto. . . . .	69
6.2.	Estudio meteorológico. . . . .	71
6.2.1.	Temperatura de referencia. . . . .	71
6.2.2.	Estudio de los vientos. . . . .	73
6.2.3.	Declinación magnética. . . . .	76
6.2.4.	Estudio de precipitaciones y otros fenómenos climatológicos. . . . .	77
6.2.5.	Estudio de visibilidad y nubosidad. . . . .	79
<b>7.</b>	<b>Subsistemas de movimiento de aeronaves</b>	<b>81</b>
7.1.	Aeronave de diseño. . . . .	81
7.2.	Área de aproximación final y despegue (FATO). . . . .	82
7.3.	Área de seguridad operacional (SA). . . . .	83
7.4.	Protección ante el downwash. . . . .	84
7.5.	Área de toma de contacto y elevación inicial (TLOF). . . . .	85
7.6.	Pendiente lateral de protección. . . . .	86
7.7.	Calles de rodaje. . . . .	86
7.8.	Rutas de rodaje. . . . .	88
7.8.1.	Rutas de taxi en tierra. . . . .	88
7.8.2.	Rutas de taxi aéreas. . . . .	88
7.9.	Puestos de estacionamiento. . . . .	89
7.9.1.	Área de seguridad del puesto de estacionamiento. . . . .	89
7.10.	Localización y separación entre FATOs. . . . .	90
<b>8.</b>	<b>Servidumbres</b>	<b>91</b>
8.1.	Superficies limitadoras de obstáculos (OLs). . . . .	92
8.1.1.	Generalidades. . . . .	93
8.1.2.	Integración de espacios de superficie de aproximación o ascenso y el SA. . . . .	93
8.1.3.	Número y separación de las superficies de aproximación y ascenso. . . . .	94
8.1.4.	Superficie de aproximación y elevación en el despegue. . . . .	95
8.1.5.	Superficie de transición. . . . .	97
8.1.6.	Modificación respecto al caso de aplicación. . . . .	98
8.2.	Volumen libre de obstáculos (OFVs). . . . .	98
8.2.1.	Volumen de referencia bidireccional. . . . .	99
<b>9.</b>	<b>Ayudas visuales</b>	<b>103</b>
9.1.	Señalización y balizamiento. . . . .	103
9.1.1.	Indicador de dirección del viento. . . . .	103
9.1.2.	Señal de identificación del vertipuerto. . . . .	104
9.1.3.	Señal de máxima masa permitida. . . . .	104
9.1.4.	Señal de identificación de la FATO. . . . .	105
9.1.5.	Indicador del parámetro <i>D</i> . . . . .	106
9.1.6.	Señal de perímetro de la FATO. . . . .	106
9.1.7.	Indicadores de perímetro de TLOF. . . . .	106
9.1.8.	Señal de punto de toma de contacto y posicionamiento. . . . .	107

9.1.9.	Marcas de puestos de estacionamiento para aeronaves VTOL . . . . .	107
9.1.10.	Señal de identificación del vertipuerto. . . . .	108
9.2.	Luces e iluminación del vertipuerto. . . . .	108
9.2.1.	Faro del vertipuerto. . . . .	108
9.2.2.	Sistema de iluminación de aproximación. . . . .	109
9.2.3.	Sistema de iluminación para la alineación de la trayectoria de vuelo. . . . .	110
9.2.4.	Sistema de guía de alineación visual. . . . .	111
9.2.5.	Indicador visual de pendiente de aproximación. . . . .	111
9.2.6.	Sistema de iluminación FATO. . . . .	112
9.2.7.	Sistema de iluminación de la TLOF. . . . .	113
9.2.8.	Iluminación de la marca de identificación del vertipuerto. . . . .	113
9.2.9.	Iluminación del área de estacionamiento. . . . .	114
9.2.10.	Iluminación de la rutas de taxi. . . . .	114
<b>10.</b>	<b>Dimensionamiento de la infraestructura</b>	<b>115</b>
10.1.	Configuración del vertipuerto. . . . .	115
10.1.1.	Requisitos de operación . . . . .	115
10.1.2.	Secuencia de operación y coeficientes de ocupación . . . . .	117
10.2.	Edificación y equipos aeroportuarios. . . . .	119
10.2.1.	Elección del Nivel de Servicio . . . . .	119
10.2.2.	Parámetros para el Nivel de Servicio A . . . . .	119
10.2.3.	Check-in . . . . .	119
10.2.4.	Control de Pasaportes de Salida . . . . .	121
10.2.5.	Control de Seguridad . . . . .	122
10.2.6.	Zona de Embarque . . . . .	124
10.2.7.	Control de Pasaportes de Llegada . . . . .	125
10.2.8.	Hall de Llegadas . . . . .	126
10.2.9.	Superficie de la terminal. . . . .	127
10.2.10.	Hangares . . . . .	128
10.3.	Estimación de Potencia . . . . .	129
10.4.	Instalaciones y Equipos de Respuesta a Emergencias. . . . .	130
10.4.1.	Cálculo del Área Crítica Práctica . . . . .	130
10.4.2.	Cantidad de Agua y Espuma Necesaria . . . . .	130
10.4.3.	Instalaciones de Extinción y Equipamiento de Rescate . . . . .	131
10.4.4.	Estimación del Espacio Requerido . . . . .	131
10.5.	Dimensionamiento lado aire. . . . .	132
10.5.1.	Tipología y posibles configuraciones . . . . .	132
10.5.2.	Distribución final del vertipuerto. . . . .	134
10.6.	Planos del vertipuerto. . . . .	137
<b>11.</b>	<b>Servicio de taxi aéreo. Caso de negocio</b>	<b>139</b>
11.1.	Adquisición y Costes de Aeronaves . . . . .	139
11.1.1.	Análisis de la Demanda y Necesidades de Flota . . . . .	139
11.2.	Costes de Explotación . . . . .	141
11.2.1.	Costes Salariales . . . . .	141
11.2.2.	Costes de Mantenimiento . . . . .	142
11.2.3.	Costes de Baterías . . . . .	143
11.3.	Costes de Ventas . . . . .	144
11.3.1.	Tarifas Aeroportuarias . . . . .	144
11.3.2.	Costes de Recarga de Baterías . . . . .	145
11.3.3.	Salarios de Pilotos . . . . .	146
11.3.4.	Costes de Comercial/Marketing . . . . .	146
11.4.	Costes Financieros y Amortización . . . . .	147
11.4.1.	Costes Financieros . . . . .	147

11.4.2. Costes de Amortización . . . . .	148
11.5. Estimación de Facturación y Beneficios a Largo Plazo . . . . .	148
11.5.1. Hipótesis Iniciales . . . . .	148
11.5.2. Distribución de Costes Anuales . . . . .	148
11.5.3. Proyección de Ingresos y Resultados Netos . . . . .	149
11.5.4. Cálculo del ROI . . . . .	149
11.6. Cálculo de la Tarifa por Vuelo . . . . .	149
11.6.1. Cálculo de la Tarifa por Pasajero . . . . .	150
11.6.2. Cálculo de la Tarifa por Kilómetro . . . . .	150
11.7. Proyecciones Financieras. . . . .	152
<b>12. Pliego de Condiciones</b>	<b>155</b>
12.1. Objeto. . . . .	155
12.2. Condiciones de ejecución. . . . .	155
12.2.1. Descripción. . . . .	155
12.2.2. Supervisión. . . . .	155
12.2.3. Conocimientos requeridos. . . . .	156
12.3. Condiciones de los materiales. . . . .	156
12.3.1. Descripción. . . . .	156
12.3.2. Elementos software. . . . .	156
12.3.3. Hardware . . . . .	156
12.3.4. Material adicional. . . . .	157
<b>13. Presupuesto</b>	<b>159</b>
13.1. Coste del Material . . . . .	159
13.2. Costes de Oficina . . . . .	159
13.3. Costes de Personal . . . . .	160
13.4. Presupuesto Total . . . . .	160
<b>14. Objetivos de Desarrollo Sostenible</b>	<b>161</b>
14.1. ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico . . . . .	161
14.2. ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura . . . . .	162
14.3. ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles . . . . .	162
<b>15. Conclusiones</b>	<b>163</b>
<b>16. Líneas futuras del proyecto.</b>	<b>165</b>

# Índice de figuras

2.1. Drivers para la descarbonización del transporte. Fuente: Propia. . . . .	25
3.1. Concepto del vehículo <i>autoplane</i> . Fuente:[Humennyi et al., 2023] . . . . .	31
3.2. Número acumulado de servicios UAM en la última década. Fuente: [Cohen et al., 2021]. . . . .	32
4.1. Clasificación y configuraciones eVTOL. Fuente: Propia. . . . .	39
4.2. Clasificación y configuraciones eVTOL. Fuente: [Ugwueze et al., 2023]. . . . .	40
4.3. Liliium Jet concept. Fuente: [Liliium] . . . . .	44
4.4. Joby S4 concept. Fuente: [Aviation] . . . . .	45
4.5. Wisk Cora concept. Fuente: [Wisk] . . . . .	46
4.6. Dufour Aero 3 concept. Fuente: [Dufour]. . . . .	47
4.7. Volocopte Volocity concept. Fuente: [Volocopter] . . . . .	48
4.8. Vertical VX4 concept. Fuente: [Vertical]. . . . .	48
4.9. eHang 216 concept. Fuente: [eHang]. . . . .	49
5.1. Rango de operación para un radio de 10 <i>km</i> . . . . .	52
5.2. Rango de operación para las misiones de medio y largo alcance. . . . .	53
5.3. Análisis demográfico de la Comunidad Valenciana.Fuente: [IVE, b]. . . . .	56
5.4. Población de los municipios en la provincia de Valencia. Fuente: [IVE, b]. . . . .	56
5.5. Congestión del tráfico en Valencia durante la franja horaria 8:00-9:00 de referencia. Fuente: [TomTom]. . . . .	58
5.6. Análisis de la congestión del tráfico en Valencia en términos relativos respecto a la franja horario 8:00-9:00. Fuente: [TomTom]. . . . .	59
5.7. Distribución de los pasajeros según O/D desde el aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENA, 2022]. . . . .	61
5.8. Comparación de los tiempos de trayecto en el caso de commuting. Fuente: [TomTom, 2023a]. . . . .	63
5.9. Comparación de los tiempos de trayecto en el caso de lugares de interés. Fuente: [TomTom, 2023a]. . . . .	63
5.10. Tiempos para J.Sorolla-Aeropuerto en minutos. Fuente: [TomTom, 2023a]. . . . .	64
5.11. Comparación de los tiempos de trayecto en el caso de medio y largo alcance. Fuente: [TomTom, 2023a]. . . . .	65
5.12. Distribución horaria de las operaciones para el aeropuerto de Valencia. Fuentes: [AENA, 2010], [Flightradar24, 2023]. . . . .	66
5.13. Distribución horaria de la demanda para el vertipuerto según la distribución del aeropuerto de Valencia. . . . .	67
6.1. Parcelas disponibles dentro de un rango de 1 km de distancia desde Joaquín Sorolla. Fuente: [IGV]. . . . .	69
6.2. Proximidad de los edificios respecto a la Parcela F. Fuente: [Earth]. . . . .	70
6.3. Emplazamiento final del vertipuerto y punto de referencia. [Earth]. . . . .	71
6.4. Rosa de los vientos correspondientes a la localización de referencia. Fuente: Propia. . . . .	75
6.5. Declinación magnética para el emplazamiento seleccionado. Fuente: [IGN]. . . . .	77

6.6.	Precipitación media anual en la provincia de Valencia (1950-2022). Fuente: [AEMET, 2022]. [AEMET]. . . . .	77
6.7.	Precipitación media mensual medida en mm. Fuente: [AEMET]. . . . .	78
6.8.	Evaluación de la humedad promedio en la ciudad de Valencia. Fuente: [AEMET].	79
6.9.	Categorías de nubosidad en Valencia. Fuente: [AEMET]. . . . .	79
6.10.	Datos de visibilidad y altura de nubes en el Aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENNA, 2010] . . . . .	80
7.1.	Dimensiones de la aeronave de diseño y valor D correspondiente. . . . .	82
7.2.	Requisitos de diseño para el dimensionamiento de la FATO. Fuente: [EASA, 2022].	83
7.3.	Dimensionamiento de la Fato y área de seguridad. . . . .	84
7.4.	Extensión del área de protección de downwash para vertipuertos elevados. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	85
7.5.	Configuraciones de pendiente lateral de protección según complejidad de distribución respecto a las FATO y SA. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	86
7.6.	Distribución correspondiente al dimensionado de las calles de rodaje para el vertipuerto planteado. . . . .	87
7.7.	Dimensionado de las rutas de taxi en tierra para el vertipuerto planteado. . . . .	88
7.8.	Dimensionado de las rutas de taxi aéreas para el vertipuerto planteado. . . . .	89
8.1.	Dimensiones y pendientes correspondientes a las OLSs para FATOs en condiciones visuales. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	92
8.2.	Círculo de referencia y separación de superficies por 135°. Fuente: [EASA, 2022].	94
8.3.	Anchos correspondientes a las superficies de aproximación y ascenso en el despegue. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	96
8.4.	Superficie de aproximación del vertipuerto. . . . .	96
8.5.	Superficie de transición del vertipuerto en perfil (metros). . . . .	97
8.6.	Superficie de transición del vertipuerto en planta (metros). . . . .	97
8.7.	Criterio de diseño del volumen libre de obstáculos. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	99
8.8.	Volumen bidireccional del vertipuerto en metros. . . . .	100
9.1.	Señalización e identificación del vertipuerto. . . . .	104
9.2.	Señal de máxima masa permitida expresada en centímetros. . . . .	105
9.3.	Dimensiones estipuladas para los identificadores de la FATO. Fuente: [EASA, 2022]	105
9.4.	Características de destellos para el faro del vertipuerto. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	109
9.5.	Diagrama de isocandela para el faro del vertipuerto. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	109
9.6.	Sistema de luces de aproximación. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	110
9.7.	Iluminación y señalización para la alineación de trayectoria de vuelo. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	110
9.8.	Sistema de iluminación para la alineación visual. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	111
9.9.	Sistema de iluminación HAPI. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	112
9.10.	Iluminación correspondiente a la marca “V”. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	113
10.1.	Proceso de operación de un vertipuerto. . . . .	118
10.2.	Proceso de operación de un vertipuerto. . . . .	118
10.3.	Referencia del manual frente a configuración de cola única. Fuente: [IATA, 2004].	126
10.4.	Ejemplo de topología lineal que cumple con la nueva regulación de la EASA. . . . .	132
10.5.	Ejemplo de topología <i>pier</i> que cumple con la nueva regulación de la EASA. . . . .	133
10.6.	Ejemplo de topología satélite que cumple con la nueva regulación de la EASA. . . . .	133
10.7.	Distribución TLOF y servidumbres en el espacio disponible. . . . .	134
10.8.	Distribución TLOF-stands elegida para el vertipuerto. . . . .	135
10.9.	Distribución de las instalaciones en el emplazamiento. . . . .	135
10.10.	Distribución final en planta del vertipuerto. . . . .	136
10.11.	Plano del Vertipuerto. . . . .	137
10.12.	Plano de servidumbres (1). . . . .	138



10.13Plano de servidumbres (2). . . . .	138
14.1. Tabla de los objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: [ONU]. . . . .	161



# Índice de tablas

2.1. Congestión del tráfico en las ciudades españolas. Fuente: TomTom . . . . .	27
4.1. Comparación de características y ventajas de diferentes configuraciones de eVTOL	43
4.2. Lilium Jet: Especificaciones técnicas. Fuente: [eVTOLnews, b] . . . . .	44
4.3. Joby Aviation S4: Especificaciones técnicas. Fuente: [Aviation] . . . . .	45
4.4. Wisk Aero Gen 6: Especificaciones técnicas. Fuente: [Wisk] . . . . .	46
4.5. Dufour Aero 3: Especificaciones técnicas. Fuente: [Dufour]. . . . .	47
4.6. Volocopter 2X: Especificaciones técnicas. Fuente: [eVTOLnews, c]. . . . .	48
4.7. Vertical VX4: Especificaciones técnicas. Fuente: [Vertical]. . . . .	49
4.8. eHang 216: Especificaciones técnicas. Fuente: [eVTOLnews, a]. . . . .	50
5.1. Municipios con más de 30.000 habitantes en la provincia de Valencia. Fuente: [INE]. . . . .	57
5.2. Media diaria de visitantes en el municipio de Dènia según tasa de procedencia (2019). Fuentes: [Turismo], [IVE, a]. . . . .	61
5.3. Mayor tráfico de pasajeros según ruta O/D para el aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENA, 2022]. . . . .	61
5.4. Parámetros de diseño del aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENA, 2010]. . . . .	66
6.1. Parcelas disponibles con superficie superior a $1.000 m^2$ . Fuente: [IGV]. . . . .	70
6.2. Coordenadas del punto de referencia del vertipuerto. Fuente: Propia. . . . .	71
6.3. Definición de la estación meteorológicas más cercana al vertipuerto. Fuente: [AEMET]. . . . .	71
6.4. Registro de las temperaturas medias mensuales medidas en $^{\circ}C$ durante los años 2013 a 2022. Fuente: [AEMET]. . . . .	72
6.5. Registro de las temperaturas máximas mensuales medidas en $^{\circ}C$ durante los años 2013-2022. Fuente: [AEMET]. . . . .	72
6.6. Registro de los vientos según intensidad y orientación para el período 2013-2022. Fuente: [AEMET]. . . . .	73
6.7. Frecuencia normalizada de los vientos según intensidad y orientación para el período 2013-2022. Fuente: Propia. . . . .	74
6.8. Frecuencia normalizada de los vientos según intensidad para el período 2013-2022. Fuente: Propia. . . . .	74
6.9. Frecuencia de los vientos según su orientación para el período 2013-2022. Fuente: Propia. . . . .	74
6.10. Días promedio mensuales de lluvia en Valencia. Fuente: [AEMET]. . . . .	78
6.11. Días promedio mensuales de bochorno en Valencia. Fuente: [AEMET]. . . . .	78
6.12. Distribución mensual promedio entre cobertura nublada y despejada. Fuente: [AEMET]. . . . .	80
7.1. Comparación de parámetros de diseño entre las tres propuestas más avanzadas. .	82
8.1. Dimensiones y pendinetes para la superficie de aproximación y elevación en despegue para condiciones de operación visual. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	95
8.2. Superficie de aproximación y ascenso en despegue para condiciones NVFR. . . .	97

8.3. Dimensiones y pendientes para la superficie de transición en configuración visual.	97
8.4. Alturas máximas y distancias del entorno respecto al vertipuerto. . . . .	98
8.5. Parámetros mínimos/máximos del procedimiento de despegue y aterrizaje vertical. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	99
8.6. Valores de referencia propuestos en la normativa para volumen bidireccional. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	100
9.1. Dimensiones del indicador de viento según el tipo de vertipuerto. Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	103
10.1. Tiempos estimados según operación. . . . .	116
10.2. Resultados del análisis de capacidad del vertipuerto con un TLOF y cuatro stands.	118
10.3. Tabla de Niveles de Servicio (LoS). Fuente: [IATA, 2004]. . . . .	119
10.4. Características del área de check-in. . . . .	121
10.5. Características del área de control de pasaportes de salida. . . . .	122
10.6. Características del área de control de seguridad. . . . .	124
10.7. Características del área de zona de embarque. . . . .	125
10.8. Características del área de control de pasaportes de llegada. . . . .	126
10.9. Características del área del hall de llegadas. . . . .	127
10.10Resumen de los espacios requeridos en la terminal . . . . .	128
10.11Resumen de los espacios destinados a llegadas y salidas . . . . .	128
10.12Equipamiento de Protección Personal (PPE). Fuente: [EASA, 2022]. . . . .	131
11.1. Proyección de Demanda de Pasajeros y Necesidades de Flota (2025-2029) . . . .	140
11.2. Proyección de Demanda de Pasajeros y Necesidades de Flota (2030-2034) . . . .	140
11.3. Estructura de Personal Básico (2025). . . . .	141
11.4. Proyección de Crecimiento del Equipo (2025-2029) . . . . .	141
11.5. Proyección de Crecimiento del Equipo (2030-2034) . . . . .	141
11.6. Costes Anuales de Salarios (2025) . . . . .	142
11.7. Proyección de Costes Salariales Anuales sin Pilotos (2025-2029) . . . . .	142
11.8. Proyección de Costes Salariales Anuales sin Pilotos (2030-2034) . . . . .	142
11.9. Coste Anual de Mantenimiento de las Aeronaves (2025-2034) . . . . .	142
11.10Costes Anuales de Baterías (2025-2029) . . . . .	143
11.11Costes Anuales de Baterías (2030-2034) . . . . .	144
11.12Tarifas Aeroportuarias en Málaga en euros (Eliminando Combustibles). . . . .	144
11.13Costes de Tarifas Aeroportuarias del Vertipuerto (2025-2034) . . . . .	145
11.14Coste Total de Recarga Mensual y Anual (2025-2029) . . . . .	146
11.15Coste Total de Recarga Mensual y Anual (2030-2034) . . . . .	146
11.16Costes Salariales de Pilotos (2025-2034) . . . . .	146
11.17Costes de Comercial/Marketing (2025-2034) . . . . .	147
11.18Costes Financieros (2025-2034) . . . . .	147
11.19Costes de Amortización (2025-2034) . . . . .	148
11.20Costes Totales Anuales (2025-2029) . . . . .	149
11.21Costes Totales Anuales (2030-2034) . . . . .	149
11.22Proyección de Ingresos Totales, Costes Totales y Resultados Netos (2025-2034) .	149
11.23Cálculo del ROI (2030-2034) . . . . .	150
11.24Proyección de Vuelos Anuales y Tarifa por Vuelo (2025-2034) . . . . .	150
11.25Comparación de Tarifas por Kilómetro de Diferentes Operadoras de Helicópteros	151
11.26Cuentas de pérdidas y ganancias proyectadas (2025-2034). . . . .	152
11.27Hoja de balance de la compañía (2025-2034). . . . .	153
13.1. Coste de material . . . . .	159
13.2. Costes de oficina . . . . .	159
13.3. Costes de personal . . . . .	160
13.4. Coste total del proyecto . . . . .	160

# Glosario y Acrónimos

- AAM** Movilidad Aérea Avanzada
- AEMET** Agencia Estatal de Meteorología
- AENA** Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea
- AECOC** Asociación Española de Codificación Comercial
- AESA** Agencia Estatal de Seguridad Aérea
- AHD** Aeronaves Hora Diseño
- AHP** Aeronaves Hora Punta
- AFM** Aircraft Flight Manual
- AIP** Publicación de Información Aeronáutica
- AIS** Servicio de Información Aeronáutica
- APAPI** Abbreviated Precision Approach Path Indicator
- ASPSL** Arrays of Segmented Point Source Lighting
- ATC** Control de Tráfico Aéreo
- CAT I** Categoría I
- CE** Comisión Europea
- CO<sub>2</sub>** Dióxido de Carbono
- CS-ADR-DSN** Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design
- CS-HPT-DSN** Certification Specifications and Guidance Material for Surface-Level VFR Heliports
- C/L** Centre Line
- DEVT** Ventiladores Eléctricos de Empuje Vectorial
- d** distancia
- D** Diámetro
- DP** Decision Point
- EBIT** Earnings Before Interest and Taxes
- EBITDA** Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization
- EBT** Earnings Before Taxes
- EASA** European Union Aviation Safety Agency
- EGD** European Green Deal
- FAA** Federal Aviation Administration
- FATO** Final-Approach and Take-Off Area
- FFAS** Final-Approach and Safety Area

**GEI** Gases de Efecto Invernadero  
**HAPI** Helicopter Approach Path Indicator  
**HEMS** Helicopter Emergency Medical Services  
**ICAO** International Civil Aviation Organization  
**IEA** International Energy Agency  
**IFR** Instrument Flight Rules  
**IGV** Instituto Geográfico Valenciano  
**INE** Instituto Nacional de Estadística  
**ISO** International Organization for Standardization  
l longitud  
**MTOW** Maximum Take-Off Weight  
**NASA** National Aeronautics and Space Administration  
**NO<sub>2</sub>** Dióxido de Nitrógeno  
**N** Norte  
**NNE** Norte-Noreste  
**NNW** Norte-Noroeste  
**NE** Noreste  
**NW** Noroeste  
**NVIS** Night Vision Imaging System  
**OCU** Organización de Consumidores y Usuarios  
**OACI** Organización de Aviación Civil Internacional  
**ODS** Objetivos de Desarrollo Sostenible  
**OFV** Obstacle-Free Volume  
**OLS** Obstacle Limitation Surfaces  
**ONU** Organización de las Naciones Unidas  
**O/D** Origin/Destination  
**PAPI** Precision Approach Path Indicator  
**PAVs** Vehículos Aéreos Personales  
**pax** Passengers  
**PHD** Pasajeros Hora Diseño  
**PHP** Pasajeros Hora Punta  
**PNCCA** Control de la Contaminación Atmosférica  
**PTS-VPT-DSN** Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports  
**ROI** Return on Investment  
**RFFS** Rescue and Firefighting Services  
**R/T** Radiotelephony or Radio Communications  
**RTO** Rejected Take-Off  
**RTOD** Rejected Take-Off Distance

**RTODV** Rejected Take-Off Distance (for VTOL-Capable Aircraft)

**SA** Safety Area

**SARPs** Standards and Recommended Practices (ICAO)

**SRW** Single Rotor with Variable Speed

**S** Sur

**SSE** Sur-Sureste

**SSW** Sur-Suroeste

**SW** Suroeste

**TDP** Take-Off Decision Point

**TDPC** Touchdown Positioning Circle

**TDPM** Touchdown Positioning Marking

**TLOF** Touchdown and Lift-Off Area

**UAM** Movilidad Aérea Urbana

**UAS** Sistemas de Aeronaves no Tripuladas

**UCW** Undercarriage Width

**UTM** Sistema de Gestión de Tráfico no Tripulado

**VFR** Visual Flight Rules

**VPT** Vertiport

**VPTTF** EASA Vertiport Task Force

**VRP** Vertiport Reference Point

**VSS** Visual-Segment Surface

**VTOL** Vertical Take-Off and Landing

$\theta$  Ángulo entre dirección del viento y orientación de la pista

**W** Oeste

**WNW** Oeste-Noroeste

**WSW** Oeste-Suroeste





# Unidades de medida

' (**min**) Minutos

**cd** Candela

**cm** Centímetro

€ Euro

**g** Gramo

**Hz** Hertz

**kg** Kilogramo

**km/h** Kilómetros por hora

**kt** Nudo

**L** Litro

**L/mm<sup>2</sup>** Litro por milímetro cuadrado

**lm** Lumen

**lx** Lux

**m** Metro

**m<sup>2</sup>** Metro cuadrado

**mg** Miligramo

**ml** Mililitro

**mm** Milímetro

**ms** Milisegundo

**nm** Nanómetro

**ns** Nanosegundo

**Pa** Pascal

**s** Segundo

**t** Tonelada

° Grados

°C Grados Celsius

**V** Voltio

**W** Vatio



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación del estudio.

La motivación principal de este estudio radica en la necesidad creciente de soluciones innovadoras para la movilidad urbana en la ciudad de Valencia. En los últimos años, la congestión del tráfico y la saturación de las infraestructuras de transporte han supuesto desafíos significativos para la calidad de vida de los ciudadanos y la eficiencia del sistema de transporte. Con un crecimiento constante de la población y un aumento en el número de turistas, Valencia enfrenta una presión creciente sobre sus sistemas de transporte público y privado.

La movilidad urbana avanzada (UAM, por sus siglas en inglés) representa una respuesta prometedora a estos desafíos, ofreciendo una alternativa sostenible y eficiente para el desplazamiento dentro de la ciudad. Los vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) han emergido como una tecnología clave en este ámbito, proporcionando una solución potencial para reducir la congestión del tráfico, disminuir las emisiones contaminantes y mejorar la conectividad urbana.

Este estudio se enmarca en el contexto de una creciente atención global hacia las soluciones de transporte sostenibles y la descarbonización de las ciudades. La implementación de un vertipuerto y un servicio de taxi aéreo eVTOL en Valencia no solo aborda las problemáticas locales de movilidad, sino que también posiciona a la ciudad como un referente en innovación y sostenibilidad. Además, esta iniciativa contribuye a los objetivos de desarrollo sostenible, promoviendo una infraestructura resiliente y una mayor calidad de vida para los habitantes y visitantes de la ciudad.

El potencial de los eVTOL para transformar el paisaje del transporte urbano es significativo. Al reducir los tiempos de viaje y proporcionar una alternativa al transporte terrestre, estos vehículos pueden aliviar la carga sobre las infraestructuras existentes y ofrecer una solución flexible y rápida para los desplazamientos urbanos. Además, la integración de vertipuertos en el entorno urbano complementa el transporte intermodal, facilitando la conexión entre diferentes medios de transporte y mejorando la eficiencia global del sistema de movilidad.

En resumen, la motivación de este estudio se fundamenta en la necesidad de encontrar soluciones innovadoras y sostenibles para la movilidad urbana en Valencia, aprovechando las oportunidades que ofrecen las nuevas tecnologías como los eVTOL. Este proyecto aspira a demostrar la viabilidad técnica y económica de esta propuesta, ofreciendo una visión clara y detallada de cómo los vertipuertos y el servicio de taxi aéreo pueden integrarse de manera efectiva en el entorno urbano, contribuyendo al desarrollo tecnológico y al bienestar de la comunidad.

## 1.2. Objetivos del proyecto.

El principal objetivo de este proyecto es evaluar la viabilidad técnica, operativa y económica de implementar un vertipuerto en Valencia y operar un servicio de taxi aéreo con aeronaves eVTOL. Para alcanzar este objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- **Analizar el comportamiento de la movilidad urbana:** Estudiar las tendencias actuales y futuras de la movilidad en Valencia, identificando problemas de congestión y posibles soluciones.
- **Estimar la demanda de pasajeros:** Calcular la demanda potencial de un servicio de taxi aéreo, considerando diferentes tipos de operación y escenarios de crecimiento.
- **Dimensionar el vertipuerto:** Diseñar una infraestructura adecuada que pueda integrarse en el entorno urbano de Valencia, cumpliendo con las normativas y regulaciones pertinentes.
- **Estudiar la viabilidad financiera:** Desarrollar un modelo de negocio para la aerolínea operadora, incluyendo un análisis detallado de costes, ingresos y rentabilidad, así como la determinación de la tarifa óptima por vuelo.
- **Proponer estrategias operativas:** Implementar estrategias de mantenimiento y gestión de la flota para asegurar la operatividad continua y minimizar tiempos de inactividad.

## 1.3. Metodología.

La metodología del presente estudio se estructura en varias fases interrelacionadas para evaluar la viabilidad y justificación de un vertipuerto en Valencia y la implementación de una aerolínea sostenible para servicios de taxi aéreo.

### Análisis de Movilidad Urbana

En la primera fase, se realizará un análisis exhaustivo de la movilidad urbana en Valencia. Se recopilarán y evaluarán datos sobre el tráfico, el uso del transporte público y privado, y los patrones de movilidad de residentes y turistas. Este análisis permitirá identificar los problemas actuales de congestión y prever las tendencias futuras, destacando la necesidad de alternativas innovadoras de transporte.

### Estimación de la Demanda Potencial

La segunda fase consistirá en la estimación de la demanda potencial para el servicio de taxi aéreo. Se considerarán diferentes escenarios de operación basados en estudios de mercado y proyecciones de crecimiento de la movilidad urbana. Para ello, se analizarán datos demográficos, turísticos y de la infraestructura existente para establecer una demanda objetivo y sus previsiones de crecimiento futuro.

### Dimensionamiento de la Infraestructura

En la tercera fase, se procederá al dimensionamiento de la infraestructura necesaria para el vertipuerto. Se evaluarán los terrenos disponibles en el entorno urbano y se diseñarán las instalaciones aeroportuarias y auxiliares. Este diseño incluirá las superficies de movimiento para aeronaves y las servidumbres necesarias, cumpliendo con las regulaciones y normativas de las autoridades aeronáuticas europeas. Además, se seleccionará la aeronave más adecuada para el servicio, considerando sus requisitos operativos y técnicos.

## **Evaluación Económica y Desarrollo del Modelo de Negocio**

La cuarta fase se centrará en el desarrollo de un estudio de viabilidad económica para el modelo de negocio del servicio de taxi aéreo. Se analizarán los costes operativos, técnicos y de infraestructura, y se desarrollarán hipótesis basadas en la operativa de aerolíneas existentes. Se compararán los costes y las tarifas propuestas con otros medios de transporte, asegurando la competitividad del servicio en términos de precio por pasajero y coste por kilómetro.

## **Validación y Conclusiones**

Finalmente, se validarán los resultados obtenidos en las fases anteriores para confirmar la viabilidad y competitividad del proyecto. Se verificará la ubicación óptima para el vertipuerto, el dimensionamiento adecuado de las instalaciones, la selección de la aeronave más adecuada y se establecerá una estructura de costes detallada. Se diseñará un modelo de negocio viable y competitivo, garantizando que la tarifa propuesta sea sostenible y atractiva para los usuarios.

Una vez finalizado el proyecto, esta metodología permitirá evaluar la implementación de una solución innovadora y sostenible para la movilidad urbana en Valencia, con un modelo de negocio rentable y competitivo, contribuyendo a la mejora del transporte, la reducción de emisiones y la calidad de vida en la ciudad.



# Capítulo 2

## Estado del arte

### 2.1. Descarbonización del transporte urbano.

La descarbonización del transporte es una componente esencial en el esfuerzo global para combatir el cambio climático. La necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mitigar los efectos del cambio climático es una prioridad, y una transición hacia una energía más limpia es imperativa.

El sector del transporte desempeña un papel crucial en esta transformación. Según los datos de 2017, este sector representa aproximadamente una quinta parte de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, lo que equivale al 24 % de las emisiones relacionadas con la energía. Este dato pone de manifiesto la importancia de la descarbonización en este ámbito.

Dentro del transporte, el segmento rodado por carretera es el que más contribuye a las emisiones totales con un 75 % sobre el total. Concretamente, los vehículos de pasajeros, como los coches y autobuses son responsables de la mayor parte de esta con un 45.1 % de las emisiones totales, mientras que los camiones vinculados al transporte de mercancías representan el 29.4 %.

Se proyecta que para 2050, las emisiones del transporte podrían disminuir en más del 60 % con respecto a los niveles de 1990 si se implementan medidas eficaces de descarbonización. Por ello, la descarbonización progresiva en este sector a través de la electrificación de los diferentes medios de transporte surge como una necesidad en base a cuatro factores principales: dependencia de los combustibles fósiles, contaminación del aire, contaminación acústica y cambio climático.

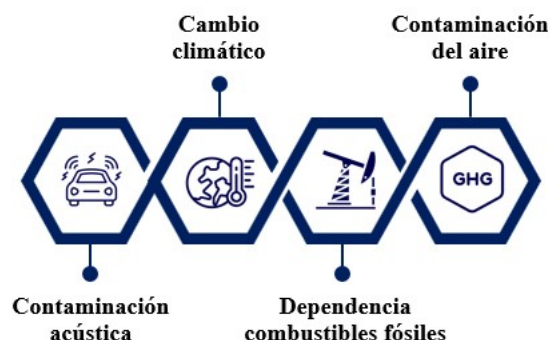


Figura 2.1: Drivers para la descarbonización del transporte. Fuente: Propia.

- **Dependencia de los combustibles fósiles.** Históricamente, las ciudades han depositado su confianza en los combustibles fósiles como principal fuente de energía para sus sistemas de transporte. Este patrón se refleja claramente en la Unión Europea, donde durante los últimos 5 años, el 93 % del consumo final de energía en el sector del transporte se basó en combustibles fósiles. Sin embargo, estos combustibles, además de ser una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), poseen una disponibilidad

limitada. En contraposición, la electrificación del transporte emerge como una alternativa sostenible, la cual permite reducir la dependencia de estos recursos no renovables y favorece la adopción de fuentes de energía renovables y limpias.

- **Contaminación del aire.** Los vehículos con motores de combustión interna son una de las principales fuentes de contaminación del aire en las ciudades, emitiendo partículas finas y gases perjudiciales que afectan la salud de los habitantes y disminuyen la calidad de vida urbana. En contraste, los vehículos eléctricos, al no emitir estos contaminantes, representan una solución prometedora para mejorar la calidad del aire y la salud pública. La transición a estos vehículos más limpios se alinea con los objetivos del Pacto Verde Europeo (EGD), que promueve una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector del transporte, contribuyendo así a una economía más sostenible y libre de emisiones.
- **Contaminación acústica.** Un problema significativo en las ciudades, además de la contaminación del aire, es la contaminación acústica. Los motores eléctricos son considerablemente más silenciosos que los motores de combustión interna, lo que contribuye a la disminución de la contaminación sonora y mejora el bienestar de los habitantes urbanos. Este cambio está en sintonía con los objetivos del Pacto Verde Europeo (EGD), que ha establecido la meta de reducir en un 30 % la proporción de personas afectadas por esta problemática para el final de la década, en comparación con las cifras de 2017.
- **Cambio climático.** Como se mencionó antes, el transporte representa una parte significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). De hecho, según la Agencia Internacional de Energía (IEA), el transporte es responsable del 24 % de las emisiones directas de CO<sub>2</sub> debido a la quema de combustibles fósiles, siendo los vehículos de carretera los productores de tres cuartas partes de estas emisiones. En este sentido, la electrificación del transporte se presenta como una de las medidas más eficaces para combatir el cambio climático, conllevando en una reducción significativa de las emisiones de carbono.

Ante la necesidad de una solución para afrontar estos desafíos, la electrificación surge como una alternativa prometedora hacia la descarbonización del transporte. Esta transformación, además de un paso hacia la sostenibilidad, representa un salto hacia un futuro más saludable y de mayor calidad de vida.

En este marco, las aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical o eVTOL, irrumpen en la escena de la movilidad urbana como una innovación revolucionaria. Estos vehículos, impulsados eléctricamente, proporcionan una solución a un segmento determinado del transporte urbano que, además de su eficiencia, es respetuoso con el medio ambiente al eliminar las emisiones de gases nocivos y reducir el impacto acústico. Por lo tanto, los eVTOL representan más que un simple avance tecnológico; son la representación de un compromiso real con un futuro más sostenible y la mejora de la calidad de vida urbana erigiéndose como un elemento fundamental en la transición hacia un transporte urbano más limpio.

## 2.2. Congestión de las áreas metropolitanas.

A medida que más personas se mudan a las ciudades en busca de nuevas oportunidades, la infraestructura urbana se ve cada vez más presionada. Los sistemas de transporte actuales luchan para acomodar la creciente demanda de sus servicios durante las horas pico, dando lugar a embotellamientos significativos tanto en el centro de las ciudades como en las carreteras de acceso. Este fenómeno genera efectos adversos para la población en términos de pérdida de tiempo y deterioro de la salud.

A pesar de que aproximadamente la mitad del espacio público en las ciudades está ocupado por carreteras, esto no es suficiente para cubrir las necesidades de movilidad de la creciente



población urbana. Según diferentes estudios, casi la mitad de los europeos pasan más de una hora diaria en sus desplazamientos al trabajo como consecuencia de la congestión del tráfico, especialmente grave en ciudades densamente pobladas, y que se caracterizan por infraestructuras deficientes.

En el contexto español, el impacto económico de la congestión del tráfico en las ciudades es alarmante. De acuerdo con el estudio realizado por la Asociación de Fabricantes y Distribuidores (AECOC) en el año 2020, se estima que la congestión del tráfico en áreas metropolitanas en las ciudades españolas, así como los efectos asociados a ella, representan un impacto económico entre 15.1 y 23.8 mil millones de euros anuales, lo que supone un porcentaje del 2 % del PIB nacional.

RK	Ciudad	Tiempo	Variación	Tiempo	Vmedia
1	Madrid	18 min	-20 s	159 h	29 km/h
2	Barcelona	18 min	-20 s	161 h	29 km/h
3	Valencia	16 min 20 s	+10 s	141 h	33 km/h
4	Gijón	15 min 40 s	-10 s	127 h	36 km/h
5	Vitoria-Gasteiz	14 min 40 s	-10 s	122 h	38 km/h
6	Sevilla	14 min 50 s	-	136 h	34 km/h
7	Málaga	14 min 40 s	-	126 h	36 km/h
8	Zaragoza	14 min 30 s	20 s	121 h	38 km/h
9	Granada	14 min 20 s	-	129 h	36 km/h
10	Palma de Mallorca	14 min 10 s	+10 s	129 h	36 km/h

Tabla 2.1: Congestión del tráfico en las ciudades españolas. Fuente: TomTom

Tomando como referencia los datos proporcionados por TomTom y reflejados en la Tabla 2.1, podemos observar que Valencia se sitúa en el tercer lugar de las ciudades que más tiempo pierden de promedio a causa de la congestión del tráfico y la que más empeora esta estadística anualmente respecto a 2021. Este factor supone un impacto para sus habitantes de la pérdida de 141h adicionales al año durante los trayectos urbanos.

Las tendencias demográficas actuales apuntan a un incremento en la urbanización mundial. En 1980, solo el 39 % de la población mundial residía en zonas urbanas, cifra que ha incrementado hasta el 56 % en la actualidad. Se espera que este crecimiento urbano continúe, con estimaciones que indican que cerca del 70 % de la población global residirá en entornos urbanos para el año 2050.

Esta expansión urbana presenta numerosos desafíos, siendo uno de los más notables el de la movilidad y el transporte. La creciente demanda de transporte en las ciudades está ejerciendo una presión significativa en la infraestructura existente, que muchas veces es incapaz de manejar la alta demanda de tráfico en las horas pico. Esta situación causa congestiones significativas en los centros de las ciudades y sus accesos, afectando la calidad de vida de los habitantes al aumentar los tiempos de desplazamiento y generar problemas de salud relacionados con la polución.

La contaminación del aire debido a los vehículos es un problema creciente a nivel mundial y especialmente en Europa. En su informe anual de 2019, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) destacó que en España se registraron 23.000 muertes prematuras relacionadas con la exposición a partículas finas de menos de 2,5 micrómetros de diámetro (PM2.5), 6.800 muertes asociadas al dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y 1.800 al ozono (O<sub>3</sub>). Estas partículas finas, que debido a su minúsculo tamaño, pueden penetrar profundamente en los pulmones, provienen principalmente de la contaminación generada por los automóviles.

Asimismo, el Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal) publicó un estudio en 2021 en el que identificaba a Madrid como la ciudad europea con el mayor número de muertes atribuibles al dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), un contaminante generado principalmente por la circulación de

vehículos.

Pero los problemas de contaminación no se limitan solo a la calidad del aire. El tráfico rodado también contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Se estima que estas emisiones representan casi el 30 % del total en la Unión Europea, y de estas, el 12 % proviene de los vehículos.

Ante estos alarmantes datos, tanto los gobiernos nacionales como los organismos internacionales están tomando medidas para reducir las emisiones. Por ejemplo, la Comisión Europea presentó en diciembre de 2020 la *Estrategia para una Movilidad Inteligente y Sostenible*, con el objetivo de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 90 % en el sector del transporte para 2050.

Por su parte, en España, el Ministerio de Transición Ecológica aprobó el *Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica* (PNCCA) en septiembre de 2019, que tiene como objetivo reducir la contaminación en los entornos urbanos en un 35 % en la próxima década. Como consecuencia a este desafío medioambiental y ante los objetivos marcados por los diferentes organismos institucionales en respuesta a la creciente congestión y contaminación en las ciudades, se están explorando nuevas formas de transporte, como la Movilidad Aérea Urbana (UAM), que promete revolucionar el transporte en áreas densamente pobladas ofreciendo una alternativa al tráfico rodado de manera sostenible para el transporte urbano.

No obstante, a pesar de estos esfuerzos, un estudio de 2018 de la Organización de Consumidores y Usuarios (OCU) mostró que el automóvil sigue siendo el medio de transporte más utilizado en España, con más del 30 % de los ciudadanos afirmando que lo usan de 5 a 7 días a la semana. Por lo tanto, es evidente que se necesita un cambio fundamental en los patrones de transporte para lograr los objetivos medioambientales y mejorar la calidad del aire.

### **2.3. Soluciones industriales y tecnologías emergentes.**

El desarrollo de nuevas tecnologías y la obsolescencia de las antiguas, junto con el cambio de diversas actividades económicas y su interacción, son factores clave que impulsan el crecimiento económico mediante transformaciones estructurales en las industrias. Las tecnologías emergentes tienen el potencial de alterar el statu quo significativamente, donde el proceso de formación de una nueva industria se divide generalmente en tres etapas: la etapa inicial, la de coevolución y la de crecimiento.

En la etapa inicial, se desafía el mercado, el sistema tecnológico o la industria existente, aunque el cambio y desarrollo de la nueva industria aún no ha avanzado considerablemente. Los impulsores principales de esta fase incluyen avances científicos y tecnológicos que compiten con productos o servicios ya existentes. Las innovaciones disruptivas pueden surgir tanto en nuevos nichos de mercado como en segmentos de mercado previamente poco desarrollados. En esta fase, se generan múltiples categorías de mercado y nuevas identidades industriales, lo que aumenta las oportunidades empresariales y la creación de nuevas empresas.

La etapa de coevolución se caracteriza por interacciones mutuas entre las empresas involucradas, lo que se traduce en un aumento de la comunicación sobre sus actividades dentro de la nueva industria. Esta fase se distingue por un incremento en las colaboraciones entre empresas, mayor cobertura mediática y acciones estratégicas colectivas para posicionarse en el mercado. Durante esta etapa, se desarrollan las estructuras industriales, modelos de negocio y cadenas de valor, y se fomenta la cooperación para establecer estándares que mitiguen las incertidumbres emergentes y mejoren la compatibilidad e interoperabilidad entre las empresas.

Finalmente, la etapa de crecimiento se establece cuando los procesos y dinámicas de las fases anteriores se consolidan y la industria alcanza la madurez. En esta fase, la industria puede transformarse en un submercado diferenciado o en un nicho tecnológico dentro de una industria ya existente. Se producen inversiones irreversibles y compromisos tecnológicos y productivos, incluyendo estrategias de alianzas para adquirir propiedad intelectual y aumentar la capacidad

de producción. La etapa de crecimiento se caracteriza por un aumento significativo en las ventas, la mejora de la calidad del producto y una clarificación de la competencia, atrayendo nuevos actores al mercado que buscan competir por los recursos disponibles.

En resumen, la evolución de tecnologías emergentes, la coevolución entre las partes interesadas y el crecimiento de la industria son elementos fundamentales en el proceso de desarrollo de una nueva industria. A medida que se desarrollan y adoptan nuevas tecnologías en la Movilidad Aérea Urbana (UAM), se espera que se produzcan cambios significativos en los sistemas existentes, las estructuras de la industria y los modelos de negocio. Comprender y gestionar estas etapas de desarrollo resulta de alto valor para alcanzar una implementación exitosa de la UAM y aprovechar los beneficios económicos y sociales que ofrece esta nueva forma de movilidad.



# Capítulo 3

## Movilidad aérea urbana

### 3.1. Evolución histórica y antecedentes.

A comienzos del siglo XX, con la aviación aún en su etapa más incipiente, la idea de un automóvil volador capturó la imaginación del público. Uno de los primeros pioneros en este campo fue Glenn Curtiss, quien presentó en 1917 el '*Autoplane*', un diseño innovador que buscaba fusionar la funcionalidad de un automóvil con las capacidades de vuelo de un avión. Aunque el *Autoplane* nunca llegó a ser comercialmente viable, su concepción ayudó a cimentar la idea de un futuro en el que los vehículos voladores fueran una realidad.

En la década de 1920, con el auge de la industria automovilística, varias figuras prominentes, incluyendo al famoso industrial Henry Ford, intentaron de su propia mano en la creación de autos voladores. El Ford Flivver, presentado en 1926, fue uno de los más conocidos de estos intentos. A pesar de las limitaciones técnicas y los desafíos económicos que impidieron el despegue comercial de estos proyectos, sembraron las primeras semillas de lo que vendría en el futuro de la movilidad aérea.



Figura 3.1: Concepto del vehículo *autoplane*. Fuente:[Humennyi et al., 2023]

El concepto de la UAM tomó una forma más concreta en la década de 1950, con la aparición de los servicios de trayectos programados en helicóptero. Las ciudades de Los Ángeles, Nueva York y San Francisco fueron pioneras en el establecimiento de estos servicios, que proporcionaban un transporte aéreo regular tanto para las personas como para la correspondencia.

Estos servicios, aunque tuvieron un cierto éxito en su momento, también pusieron de relieve los desafíos que la UAM debía superar. Problemas como la seguridad, la emisión de ruidos y los altos costos operativos emergieron como obstáculos importantes para la adopción generalizada de la movilidad aérea. Sin embargo, a pesar de estos contratiempos, estos servicios señalaron el potencial de la UAM para cambiar de manera radical el transporte urbano.

El resurgimiento de la UAM a partir de la década de 2010 ha sido en gran parte debido

al avance tecnológico y el crecimiento exponencial de los Sistemas de Aeronaves no Tripuladas (UAS), más conocidos como drones. Estos dispositivos de vuelo se han introducido en un amplio abanico de aplicaciones, incluyendo la fotografía aérea, la inspección de infraestructuras, y la entrega de paquetes. Su versatilidad y eficacia han abierto la puerta a la posibilidad de su uso en el transporte de personas.

Esta expansión de las aplicaciones de los drones ha reavivado el interés en la movilidad aérea. Empresas emergentes y gigantes tecnológicos han comenzado a explorar y desarrollar vehículos aéreos personales (PAVs) y taxis aéreos. Se han logrado avances importantes en baterías de alta capacidad, sistemas de navegación autónomos y técnicas de gestión del tráfico aéreo, lo que ha hecho que el concepto de UAM, que antes parecía de ciencia ficción, esté más cerca de convertirse en una realidad tangible.

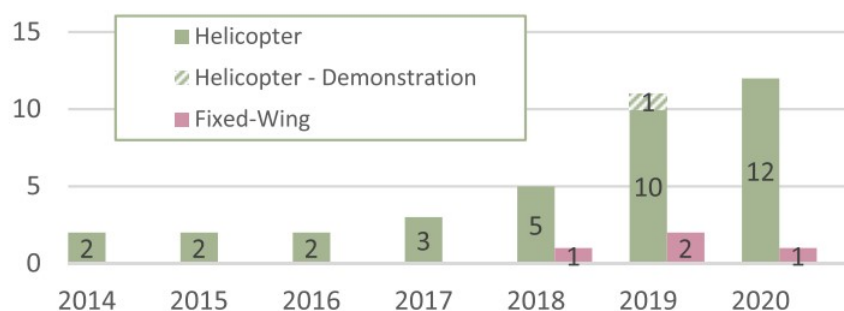


Figura 3.2: Número acumulado de servicios UAM en la última década. Fuente: [Cohen et al., 2021].

La aparición de PAVs y taxis aéreos ha ido acompañada de un aumento en la demanda de soluciones de movilidad aérea. A medida que las ciudades crecen y el tráfico en las calles se vuelve cada vez más congestionado, el transporte aéreo rápido y eficiente se presenta como una solución potencial a estos problemas, provocando que ciudades como Dubai y Singapur se han posicionado a la vanguardia en la implementación de proyectos de UAM, poniendo en marcha marcos regulatorios favorables y fomentando la infraestructura necesaria para su adopción.

Además, organismos como la NASA están contribuyendo activamente a la creación de ecosistemas de Movilidad Aérea Avanzada (AAM) y de marcos regulatorios. Un ejemplo de ello es el programa de la NASA "Grand Challenge", que tiene como objetivo desarrollar y promover un entorno seguro y eficiente para la movilidad aérea en áreas urbanas y suburbanas [NASA, 2020].

Por otro lado, las autoridades reguladoras de aviación, como la Administración Federal de Aviación (FAA) en los Estados Unidos y la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA), están trabajando en establecer las directrices y reglamentaciones necesarias para la operación segura de estas aeronaves en el espacio aéreo. Estas regulaciones abarcan desde los estándares de certificación de los vehículos hasta las reglas de operación y control del tráfico aéreo.

Actualmente, el sector de la UAM está experimentando un crecimiento significativo. Se está invirtiendo cada vez más en la industria, y se prevé que en los próximos años genere miles de millones de dólares en ingresos. En este contexto, el desarrollo de la UAM durante la última década refleja el progreso de la idea de movilidad aérea de ser una visión futurista a convertirse en una realidad cada vez más cercana.

## 3.2. Mercados UAM.

El mundo está experimentando una verdadera revolución en la movilidad aérea urbana con la emergencia de los eVTOL. Este tipo de aeronaves prometen redefinir los límites de transporte y movilidad, trascendiendo las formas convencionales de viajar y abriendo un amplio espectro de nuevas oportunidades.

Es fundamental entender que el papel de los eVTOL no se limita al transporte de pasajeros. El alcance de estos vehículos se extiende a diversas áreas y sectores, lo que refleja su flexibilidad y versatilidad, influyendo de manera significativa en sectores tan dispares como el logístico, el de emergencias y servicios sanitarios, la seguridad y vigilancia, entre otros.

Uno de sus principales atributos reside en su capacidad para adaptarse a diferentes tareas y operaciones. Por ejemplo, los eVTOL pueden facilitar la logística, especialmente en lo que se refiere a la entrega de bienes en áreas urbanas densas y rurales. En el sector de la salud, pueden responder rápidamente a emergencias, proporcionando servicios de ambulancia aérea y transporte de órganos. Para la seguridad y vigilancia, los eVTOL pueden ofrecer servicios de monitorización y seguimiento.

A continuación, se describen las aplicaciones potenciales de los eVTOL en varios segmentos de mercado, incluyendo, pero no limitándose a, transporte comercial, servicios de emergencia, logística, seguridad y vigilancia, mantenimiento, entretenimiento, investigación científica, y agricultura y ganadería.

- **Transporte.** Los eVTOL prometen alterar radicalmente la manera en que nos movemos, particularmente en las ciudades congestionadas. Estos vehículos pueden servir como una solución de transporte aéreo, proporcionando una alternativa eficiente a los medios de transporte terrestres y reduciendo significativamente los costos de infraestructura.
- **Agricultura.** En el sector agrícola, los eVTOL pueden ayudar a modernizar prácticas que hasta ahora han dependido en gran medida de métodos manuales y tradicionales. Los eVTOL pueden usarse para tareas como la vigilancia de los cultivos, la aplicación de pesticidas de manera selectiva, y la recopilación de datos, lo que podría resultar en prácticas agrícolas más eficientes y precisas.
- **Servicios Médicos de Emergencia.** Los eVTOL pueden desempeñar un papel vital en el sector de la salud, especialmente en situaciones de emergencia. Las investigaciones sugieren que el uso de eVTOL como ambulancias aéreas puede reducir significativamente los tiempos de respuesta y mejorar los resultados en casos de emergencias médicas como los paros cardíacos.
- **Búsqueda y Rescate.** En situaciones de desastre, los eVTOL pueden ser herramientas valiosas para las operaciones de búsqueda y rescate. Su capacidad para explorar áreas inaccesibles y proveer asistencia visual puede ser invaluable en situaciones post-desastre.
- **Fuerza del Orden y Vigilancia.** Los eVTOL también pueden desempeñar un papel importante en el cumplimiento de la ley y las operaciones de vigilancia. Los vehículos eVTOL pueden ofrecer una mayor conciencia situacional, contribuyendo a la prevención del crimen y a la mejora de la seguridad en nuestras comunidades.
- **Logística.** Finalmente, los eVTOL podrían ser un gran avance en la industria logística. Su capacidad para realizar entregas rápidas y eficientes, especialmente a áreas rurales y remotas, puede ser un cambio de juego en la distribución de bienes.
- **Entretenimiento y artes visuales.** Los eVTOL se presentan como una potencial herramienta revolucionaria en el ámbito del entretenimiento, especialmente en lo que se refiere a la producción audiovisual. La agilidad y versatilidad de estos vehículos podrían proporcionar tomas aéreas sin precedentes para la industria cinematográfica y televisiva. Además, el turismo puede verse beneficiado de la introducción de los eVTOL, ya que ofrecen la

posibilidad de realizar tours aéreos, permitiendo a los turistas admirar paisajes y ciudades desde una perspectiva completamente nueva.

- **Cartografía y topografía.** En el campo de la cartografía y la topografía, los eVTOL representan una promesa de mayor eficacia y precisión. Equipados con tecnología avanzada, estos vehículos podrían llevar a cabo estudios topográficos en extensas áreas o en regiones de difícil acceso con una eficiencia superior a la de los métodos convencionales. Al volar sobre regiones geográficamente desafiantes, los eVTOL pueden recoger datos topográficos detallados y utilizarlos para generar mapas precisos, optimizando la planificación del uso del suelo y la gestión de recursos.

En el enfoque principal de este estudio se resalta la aplicación de los eVTOL en entornos urbanos. Debido a la naturaleza de la movilidad aérea urbana y las particularidades de estas áreas densamente pobladas, se han identificado la logística y el reparto, el transporte de pasajeros y los servicios médicos como las tres aplicaciones más relevantes y con mayor potencial de transformación en estas zonas. Por lo tanto, se procederá a un análisis detallado y en profundidad de cada una de estas aplicaciones, explorando una serie de factores clave que van desde la complejidad de la implementación y las expectativas de su introducción al mercado, hasta las características de las aeronaves que operarán en cada una de estas aplicaciones, las instalaciones necesarias para su implementación y funcionamiento, y el tipo de misiones y operaciones que podrían llevar a cabo.

El objetivo es adquirir una visión completa y bien fundamentada sobre cómo los eVTOL pueden ser aplicados en estos tres sectores dentro del contexto urbano, y cómo pueden transformar la forma en que los bienes son entregados, las personas se desplazan, y los servicios de emergencia son brindados en estos entornos urbanos. Cada aspecto, desde la infraestructura necesaria hasta las misiones específicas que podrían ser realizadas, será cuidadosamente considerado para presentar una visión completa y equilibrada del futuro de la movilidad aérea urbana.

### 3.3. Definición y tamaño de mercado.

El concepto emergente de Movilidad Aérea Urbana (UAM) ha surgido como una solución de transporte aéreo que ofrece diversas aplicaciones, como la entrega de paquetes mediante drones y el transporte de pasajeros. Este enfoque revolucionario de la movilidad permite el transporte eficiente y rápido de personas y bienes en áreas urbanas densamente pobladas. La UAM se basa en el uso de drones de pasajeros altamente automatizados o completamente autónomos para ofrecer servicios de transporte cercanos a los asentamientos urbanos.

La UAM ha sido denominada también como 'taxis aéreos' o 'metros aéreos', haciendo referencia a los vehículos aéreos utilizados para esta modalidad de transporte [Kellermann et al., 2020][Glaab et al., 2019]. Estos vehículos, conocidos como eVTOLs (siglas en inglés de '*Electric Vertical Take-Off and Landing*'), son capaces de despegar y aterrizar verticalmente, lo que les permite operar en espacios reducidos sin necesidad de contar con una pista de despegue y aterrizaje convencional. La tecnología eVTOL ha experimentado avances significativos en los últimos años gracias a mejoras en el almacenamiento de energía, propulsión eléctrica y diseño de aeronaves [Rothfeld et al., 2019].

En cuanto al tamaño de mercado de la UAM, se estima que su crecimiento será considerable en los próximos años. La SESAR 3 Joint Undertaking, una asociación europea que coordina la investigación y el desarrollo en este ámbito, proyecta que el mercado del transporte de pasajeros en la UAM alcanzará un valor de al menos 2.000 millones de euros para el año 2031, con un despegue significativo a partir de 2027 [Straubinger et al., 2020].

La Comisión Europea (CE) también ha realizado estimaciones sobre el impacto económico del uso comercial de drones de pasajeros. Se prevé que este sector genere un impacto económico anual de al menos 10.000 millones de euros para el año 2035, con un aumento adicional a 15.000



millones de euros por año para 2050. Además, se espera que la implementación de la UAM cree más de 100.000 empleos directos en Europa [Scarmagnani, 2021]. Por su parte, Estados Unidos estima la creación de 100.000 empleos en un periodo de diez años (2015-2025), junto con 250.000 a 400.000 empleos adicionales en industrias relacionadas con los drones, lo que representa un impacto económico de 82.000 millones de dólares [Scarmagnani, 2021].

Estas cifras demuestran el enorme potencial de la UAM como un mercado en crecimiento y generador de empleo en el sector aeroespacial. La demanda de servicios de transporte de pasajeros y entrega de paquetes en entornos urbanos se espera que aumente considerablemente, especialmente en áreas con alta densidad de población y congestión de tráfico.

### **3.4. Desafíos de la movilidad aérea urbana.**

La Movilidad Aérea Urbana (UAM) es un campo en desarrollo que presenta diversos desafíos en su operación. A medida que se exploran nuevas aplicaciones y se desarrollan tecnologías innovadoras, es fundamental comprender y abordar estos desafíos para lograr una implementación exitosa de la UAM en entornos urbanos.

La operacionalización comercial de la UAM se enfrenta a desafíos que deben abordarse por los diferentes stakeholders para crear un entorno seguro y conveniente [Straubinger et al., 2020]. Estos desafíos comprenden diferentes categorías, abordando aspectos tecnológicos, infraestructura terrestre, regulación y aceptación social.

#### **3.4.1. Desafíos tecnológicos.**

En la subsección de desafíos tecnológicos, nos enfrentamos a una serie de obstáculos que requieren soluciones efectivas para garantizar la operación exitosa de la Movilidad Aérea Urbana (UAM). Uno de los principales desafíos a largo plazo es la creación de un sistema de gestión de tráfico no tripulado (UTM, por sus siglas en inglés) que permita la integración segura de las operaciones aéreas a baja altitud. El UTM engloba una amplia gama de servicios, como el diseño del espacio aéreo, la planificación de rutas, el control dinámico de geovallados, la gestión de contingencias y la evitación de condiciones climáticas adversas [Sengupta and Das, 2023].

Además, se plantea el desafío de desarrollar aplicaciones de navegación precisa que eviten interferencias con la aviación comercial, tripulada y no tripulada. Esto implica la necesidad de mejorar la precisión y la automatización de la navegación en espacios aéreos congestionados y en diversas condiciones climáticas (Straubinger et al., 2021). Asimismo, la interacción efectiva con los sistemas de Control de Tráfico Aéreo (ATC) y el establecimiento de un régimen de comunicación eficiente son fundamentales para asegurar la seguridad y la coordinación en el entorno de la UAM [Vascik and Hansman, 2021].

Otro desafío tecnológico significativo se relaciona con las limitaciones actuales en la tecnología de baterías. La capacidad de almacenamiento y la densidad de energía de las baterías son factores críticos que influyen en la duración del vuelo y el alcance de los vehículos eVTOL. Se requiere un avance en la tecnología de baterías para mejorar la eficiencia y reducir el peso de las aeronaves, así como los tiempos de recarga [Reiche et al., 2018].

Por último, se plantea el desafío de reducir el ruido generado por las aeronaves UAM. Esto implica la implementación de soluciones técnicas, como el ajuste de la velocidad de las palas, la configuración óptima de los rotores y el uso de mecanismos de protección adecuados [Straubinger et al., 2020]. La reducción del ruido es esencial para minimizar el impacto acústico en las áreas urbanas y fomentar la aceptación y la integración de la UAM en la sociedad.

Estos desafíos tecnológicos plantean importantes interrogantes que deben abordarse de manera integral. La superación de estos obstáculos requerirá la colaboración y la innovación conjunta

de los actores involucrados en la UAM, incluyendo empresas, reguladores y organismos de investigación. Solo mediante el desarrollo y la implementación de soluciones tecnológicas efectivas podremos garantizar una operación segura, eficiente y sostenible de la UAM en los entornos urbanos del futuro.

### **3.4.2. Desafíos de infraestructura terrestre.**

En el ámbito de la infraestructura terrestre, se presentan diversos desafíos que deben ser abordados para garantizar la implementación exitosa de la Movilidad Aérea Urbana (UAM). Uno de los desafíos clave es el diseño y desarrollo de una red de infraestructuras adecuadas para soportar las operaciones de aeronaves UAM en entornos urbanos.

En primer lugar, se requiere la creación de vertipuertos seguros y eficientes, que permitan el despegue y aterrizaje de los vehículos aéreos de manera rápida y segura. Estos vertipuertos deben estar estratégicamente ubicados en áreas urbanas para garantizar la accesibilidad y la conectividad con los destinos deseados. Además, es necesario considerar la capacidad de estos vertipuertos para acomodar un mayor volumen de tráfico aéreo en el futuro.

Otro desafío importante es la implementación de una infraestructura de carga y almacenamiento de energía eficiente para las aeronaves UAM. Dado que la autonomía de vuelo de estos vehículos está limitada por la capacidad de las baterías, se requieren estaciones de carga rápidas y confiables para garantizar un tiempo de inactividad mínimo y una operación continua.

Asimismo, la integración de la infraestructura terrestre con la infraestructura existente es esencial para garantizar una operación fluida de la UAM. Esto implica la coordinación con los sistemas de transporte terrestre, como las redes de carreteras y los sistemas de transporte público, para facilitar la conexión y la transferencia eficiente de pasajeros y carga entre los modos de transporte. La planificación y gestión del espacio aéreo también representan un desafío en términos de infraestructura terrestre. Se requiere una coordinación efectiva entre los organismos reguladores y los proveedores de servicios de navegación aérea con el objetivo de asegurar un espacio aéreo seguro y ordenado para las operaciones de la UAM.

Por último, la implementación de sistemas de comunicación y monitorización adecuados es fundamental para garantizar la seguridad y la eficiencia de las operaciones de la UAM. Esto incluye la instalación de sistemas de comunicación en tiempo real entre las aeronaves, los vertipuertos y los organismos reguladores, así como el uso de sistemas de monitorización y seguimiento para garantizar un control efectivo del tráfico aéreo.

En resumen, los desafíos de infraestructura terrestre en el contexto de la UAM implican la creación de vertipuertos seguros, la implementación de sistemas de carga de energía eficientes, la integración con la infraestructura existente, la gestión del espacio aéreo y la implementación de sistemas de comunicación y monitorización. Estos desafíos deben ser abordados de manera integral para garantizar una infraestructura terrestre sólida y eficiente que respalde la implementación exitosa de la UAM en entornos urbanos.

### **3.4.3. Desafíos normativos y regulatorios.**

La operación de la Movilidad Aérea Urbana (UAM) también enfrenta desafíos regulatorios que deben abordarse para garantizar un entorno seguro y confiable. Uno de los desafíos clave es contar con regulaciones adecuadas en cuanto a la certificación de aeronavegabilidad, para abordar cuestiones de seguridad relacionadas con el diseño, fabricación, rendimiento, respuesta a fallos y mantenimiento de las aeronaves [Reiche et al., 2018].

Hasta el momento, no se han desarrollado completamente los requisitos y certificaciones para los operadores de la UAM. Es fundamental contar con un marco regulatorio para la operación de las aeronaves, ya que esto es un requisito previo para el lanzamiento de los servicios iniciales

[Straubinger et al., 2020].

El establecimiento de regulaciones claras y actualizadas es esencial para garantizar la seguridad de las operaciones de la UAM. Esto implica definir estándares de seguridad y requisitos técnicos para las aeronaves, así como establecer directrices para los operadores en términos de capacitación, mantenimiento y gestión de riesgos.

Además, es necesario abordar la coordinación entre los diferentes organismos reguladores y autoridades competentes. La integración de la UAM en el espacio aéreo existente requiere una cooperación estrecha entre las autoridades de aviación civil, las agencias de tráfico aéreo y otras entidades reguladoras para garantizar una supervisión efectiva y una operación segura. La armonización de las regulaciones a nivel nacional e internacional también es un desafío importante. Dado que la UAM tiene el potencial de operar en diferentes ciudades y países, es necesario establecer un marco regulatorio coherente y consistente que facilite la movilidad y la interoperabilidad entre diferentes sistemas y jurisdicciones.

Asimismo, la adaptación de los marcos regulatorios existentes a las características únicas de la UAM requiere una evaluación exhaustiva y una revisión de las regulaciones actuales. Esto implica considerar aspectos como la gestión del tráfico aéreo, el uso del espacio aéreo urbano, la seguridad de vuelo, la privacidad y la protección de datos, entre otros.

En conclusión, los desafíos regulatorios en la UAM se relacionan con la necesidad de establecer regulaciones claras y actualizadas en cuanto a la certificación de aeronavegabilidad, la coordinación entre organismos reguladores, la armonización a nivel nacional e internacional, y la adaptación de los marcos regulatorios existentes. Superar estos desafíos permitirá establecer un entorno seguro y confiable para la operación de la UAM en entornos urbanos.

#### **3.4.4. Desafíos sociales y adopción de la tecnología.**

Los desafíos sociales en la implementación de la Movilidad Aérea Urbana (UAM) se pueden dividir en dos aspectos principales: la aceptación por parte de la sociedad y la adopción por parte de los usuarios. En cuanto a la aceptación social, existe un dilema sobre si la influencia de las percepciones negativas superará la influencia de los primeros adoptantes que eligen utilizar un servicio de UAM. Estudios han demostrado que algunas personas perciben a los drones de paquetes y pasajeros como posibles riesgos para la seguridad [Kellermann et al., 2020]. Además, se plantea la preocupación de si los drones de pasajeros realmente ahorrarán tiempo a los usuarios, considerando el tiempo necesario para llegar a los puntos de despegue y aterrizaje.

Otro desafío social es el nivel de ruido generado por los drones. Diversos estudios han señalado que el nivel de ruido es una preocupación importante [Pavan Yedavalli][Reiche et al., 2018][Vascik and Hansman, 2021]. Algunos investigadores también destacan la importancia del tipo de ruido generado. Los fabricantes de drones están trabajando para desarrollar aeronaves más silenciosas con menores emisiones de ruido. Sin embargo, el gran número de vuelos y drones en el aire al mismo tiempo puede anular las ventajas técnicas de los motores y rotores eléctricos en términos de reducción de ruido. Los operadores deberán encontrar el equilibrio adecuado en cuanto al número de eVTOLs por vertipuerto para lograr niveles de ruido promedio apropiados [Holden and Goel, 2016].

La adopción por parte de los usuarios también es un desafío social. La aceptación de la UAM depende de la percepción de las ventajas en comparación con las tecnologías y servicios tradicionales, así como de los beneficios directos que ofrece el uso de los drones. Los usuarios también valoran la flexibilidad, la confiabilidad y la capacidad de controlar los drones. Según el *Modelo de Aceptación de Tecnología*, la percepción de utilidad y la percepción de facilidad de uso son dos medidas fundamentales para predecir y explicar la adopción de tecnologías [Davis, 1989].

En resumen, los desafíos sociales en la UAM incluyen la aceptación por parte de la sociedad

y la adopción por parte de los usuarios. Estos desafíos están relacionados con la percepción de riesgos, la preocupación por el ruido generado por los drones y la necesidad de demostrar las ventajas y beneficios de la UAM en comparación con las alternativas tradicionales. Superar estos desafíos requerirá una comunicación efectiva, educación pública y la capacidad de los operadores para ofrecer servicios seguros, confiables y convenientes que satisfagan las necesidades y expectativas de los usuarios.

# Capítulo 4

## Aeronaves eVTOL

### 4.1. Definición y concepto eVTOL.

Los aviones eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) son la principal tecnología habilitadora para la implementación de la Movilidad Aérea Urbana (UAM). Estas aeronaves, que pueden ser pilotadas de forma convencional, a distancia o de manera autónoma, surgen dentro del contexto de la electrificación y descarbonización del transporte aéreo, erigiéndose como un subsegmento dentro de la aviación sostenible, ofreciendo una solución a un tipo de misión específica de corto alcance y en entornos urbanos, como se refleja en la Figura 4.1.

Si bien las aeronaves de despegue y aterrizaje vertical buscan proporcionar una mayor autonomía de operación, la aviación subregional y regional buscan satisfacer este tipo de misiones similares a la operación de la aviación tradicional de corto radio. Ambos segmentos, con mayor capacidad de pasajeros y alcance, están diseñados para operaciones que pueden abarcar distancias más largas que los eVTOL, pero aún dentro de un rango limitado que no compite directamente con la aviación de largo alcance. En la Figura 4.1 se observa claramente la segmentación de la aviación eléctrica, donde los eVTOL se sitúan en el extremo inferior izquierdo, indicando su capacidad para realizar vuelos cortos y llevar pocos pasajeros, en comparación con las aeronaves subregionales y regionales que tienen mayores capacidades tanto en distancia como en capacidad de carga.

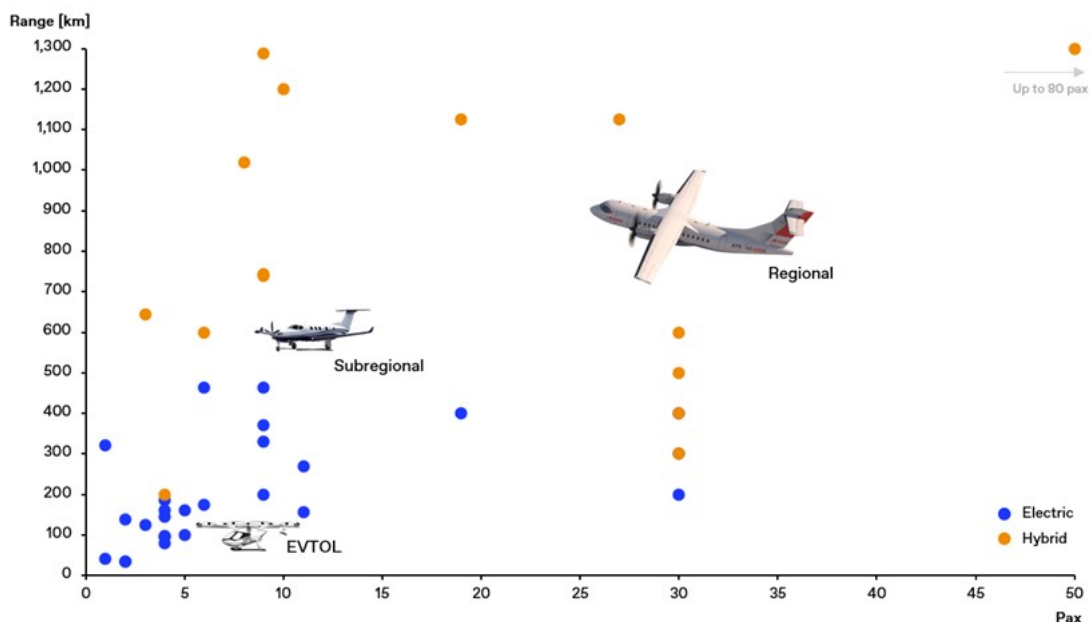


Figura 4.1: Clasificación y configuraciones eVTOL. Fuente: Propia.

Sin embargo, históricamente, los viajes aéreos de corta y media distancia han sido costosos, ruidosos y más difíciles de gestionar que los vuelos comerciales en términos de control de tráfico aéreo. En contraste, los diseños y características operativas propuestas para las aeronaves eVTOL anticipan una opción respetuosa con el medio ambiente en cuanto a emisiones, segura, asequible, pequeña, precisa, rápida, silenciosa, capaz de operar en la mayoría de las condiciones climáticas y fácil de usar y mantener.

De este modo, los fabricantes aún deben abordar una variedad de aspectos tecnológicos y sensibilidades asociadas a cada operación potencial facilitada por las aeronaves eVTOL, especialmente en lo que respecta a diseños que consideren la seguridad, el ruido, la sostenibilidad durante todo el ciclo de vida y la economía.

En base a lo comentado previamente, se puede acotar el vehículo eVTOL a una aeronave específicamente diseñada para cumplir con las demandas de la movilidad aérea urbana y otras aplicaciones de corto alcance, diseñados para operar en entornos urbanos densamente poblados, donde la infraestructura de aterrizaje y despegue tradicional es limitada o inexistente. En términos de capacidad de pasajeros, los eVTOL suelen estar configurados para transportar entre 2 y 6 personas, incluyendo al piloto, lo que los posiciona como una solución ideal para el transporte privado y servicios de taxi aéreo. Sin embargo, algunas variantes de eVTOL están siendo desarrolladas para acomodar hasta 10 pasajeros, expandiendo así su utilidad en el sector de la aviación comercial de corto alcance.

En cuanto a la autonomía, los eVTOL están diseñados para cubrir distancias relativamente cortas, con un rango operativo típico que varía entre 30 y 250 kilómetros. Esta autonomía limitada es una consecuencia tanto de las restricciones impuestas por la tecnología actual de baterías como del enfoque en misiones urbanas de corto recorrido. No obstante, se espera que con el avance de las tecnologías de almacenamiento de energía y propulsión eléctrica, la autonomía de los eVTOL se expanda, permitiendo vuelos más largos y mejorando su viabilidad como un medio de transporte urbano eficiente.

## 4.2. Tipologías y configuración de eVTOLs

La Movilidad Aérea Urbana (UAM) ha impulsado la aparición de diversos tipos de vehículos eVTOL con diferentes diseños y configuraciones. Estas categorías se basan principalmente en el enfoque utilizado para lograr el despegue vertical y el vuelo en crucero. En esta sección, exploraremos de manera detallada las distintas tipologías de estos vehículos, siguiendo la clasificación presentada en la Figura 4.2.

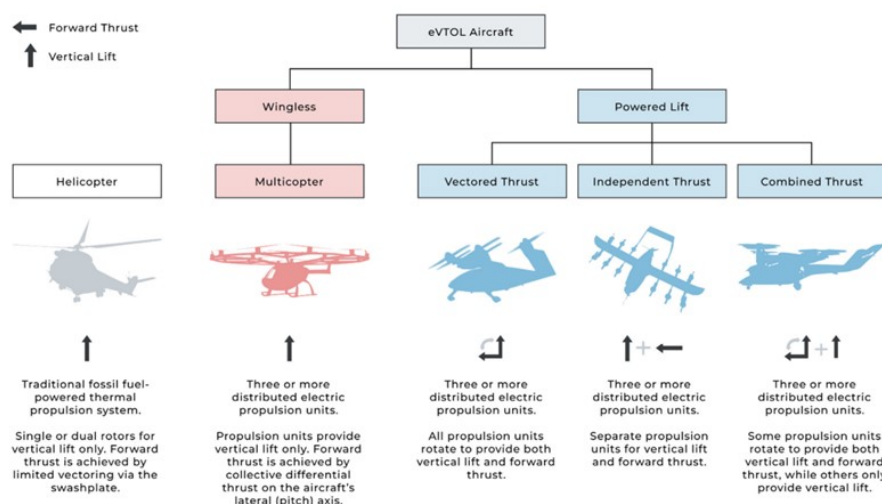


Figura 4.2: Clasificación y configuraciones eVTOL. Fuente: [Ugwueze et al., 2023].

### 4.2.1. eVTOLs sin ala (Wingless eVTOLs)

Los eVTOLs sin ala se caracterizan por su capacidad para realizar tanto el despegue y aterrizaje vertical como el vuelo hacia adelante utilizando únicamente sus unidades de propulsión. Este tipo de configuración es ideal para entornos urbanos densamente poblados, donde la capacidad de aterrizar en espacios reducidos es esencial.

#### Helicópteros

Los helicópteros son el ejemplo más tradicional de eVTOL sin ala. Utilizan uno o dos rotores principales para generar el empuje necesario tanto para el despegue vertical como para el vuelo horizontal. La inclinación de los rotores permite el control de la dirección y la velocidad del vuelo. Aunque los helicópteros han sido fundamentales en la aviación durante décadas, su dependencia de motores de combustión interna y el ruido que generan los hace menos atractivos para la movilidad urbana sostenible.

#### Multicópteros

Los multicópteros son una evolución moderna de la aviación vertical. Están equipados con tres o más rotores eléctricos distribuidos que proporcionan el empuje necesario para el despegue y el vuelo. La capacidad de variar la velocidad de cada rotor permite un control preciso y estable, ideal para operaciones en entornos urbanos. Los multicópteros están diseñados para transportar de dos a cinco ocupantes y se utilizan principalmente para servicios de taxi aéreo y emergencias. Esta configuración ofrece una gran flexibilidad y facilidad de operación, aunque su alcance y capacidad de carga son limitados en comparación con otras configuraciones de eVTOL.

### 4.2.2. eVTOLs con alas (Powered Lift eVTOLs)

Los eVTOLs con alas combinan la capacidad de despegue y aterrizaje vertical con la sustentación aerodinámica proporcionada por las alas durante el vuelo en crucero. Esto les permite una mayor eficiencia energética y un alcance superior en comparación con los eVTOLs sin ala.

#### Empuje Vectorial (Vectored Thrust)

El empuje vectorial es una técnica en la que todas las unidades de propulsión pueden rotar para proporcionar tanto el empuje vertical como el empuje hacia adelante. Esta configuración permite una transición suave entre el despegue vertical y el vuelo en crucero. Las subcategorías principales dentro de este tipo son:

- **Ala Basculante (Tilt-Wing):** En esta configuración, todo el conjunto de alas y motores puede inclinarse para cambiar la dirección del empuje de vertical a horizontal. Esto permite que la aeronave utilice las alas para generar sustentación en vuelo horizontal, mejorando significativamente la eficiencia aerodinámica y la autonomía de vuelo.
- **Hélice Basculante (Tilt-Prop):** Aquí, cada hélice puede inclinarse individualmente para cambiar la dirección del empuje. Esto ofrece una gran flexibilidad en la transición entre vuelo vertical y horizontal, y permite un control preciso de la aeronave.
- **Ventilador Basculante (Tilt-Fan):** Similar a la hélice basculante, pero utiliza ventiladores en conductos que pueden girar para proporcionar empuje en diferentes direcciones. Esta configuración es eficiente y puede reducir el ruido, lo que la hace adecuada para aplicaciones urbanas.

## Empuje Independiente (Independent Thrust)

Los eVTOLs de empuje independiente utilizan unidades de propulsión diferentes para el despegue vertical y el vuelo en crucero. Esto significa que las unidades de empuje para el ascenso vertical no se utilizan durante el vuelo hacia adelante. Esta configuración, también conocida como 'Elevación + Crucero', simplifica el diseño y puede reducir la complejidad del sistema de propulsión. Las subcategorías incluyen:

- **Propulsión Separada (Separate Lift and Cruise):** Los motores utilizados para el vuelo horizontal están separados de los utilizados para el despegue vertical. Esto permite optimizar cada sistema para su función específica, mejorando la eficiencia global de la aeronave.
- **Rotor de Velocidad Reducida (Single Rotor with Variable Speed - SRW):** Esta configuración utiliza un solo rotor grande, similar al de un helicóptero, para el despegue vertical. Durante el vuelo en crucero, la velocidad de rotación del rotor se reduce para minimizar la resistencia aerodinámica. Los eVTOLs de SRW son considerados aeronaves de despegue vertical porque poseen un ala fija que genera una parte significativa de la sustentación aerodinámica durante el vuelo horizontal. Esta configuración combina la eficiencia de vuelo de un ala fija con la capacidad de despegue vertical, proporcionando una mayor flexibilidad y eficiencia energética en comparación con configuraciones que dependen exclusivamente de los rotores para el empuje.

## Empuje Combinado (Combined Thrust)

Los eVTOLs de empuje combinado son una fusión de los conceptos de empuje vectorial y empuje independiente. En esta configuración, algunas unidades de propulsión se utilizan tanto para el despegue vertical como para el vuelo en crucero, mientras que otras se utilizan exclusivamente para el vuelo horizontal. Este diseño busca un equilibrio entre la eficiencia y la flexibilidad. Las subcategorías son:

- **Propulsión Mixta (Mixed Lift and Thrust):** En esta configuración, parte de los motores se dedica exclusivamente al vuelo horizontal, mientras que otros motores, que se usan también para el despegue vertical, pueden girar para proporcionar empuje hacia adelante.
- **Ala y Motores Combinados (Combined Wing and Motors):** Algunos eVTOLs combinan alas fijas con motores que pueden proporcionar tanto empuje vertical como horizontal. Esto permite una gran flexibilidad en las operaciones y puede mejorar la eficiencia energética en comparación con otras configuraciones.

### 4.2.3. Características y ventajas de las configuraciones eVTOL

Cada tipología de eVTOL presenta características y consideraciones únicas en términos de eficiencia, capacidad de carga, autonomía y operatividad. La comprensión de estas diferentes categorías es esencial para evaluar su idoneidad en diversos escenarios de movilidad urbana y promover el desarrollo de soluciones de transporte aéreo sostenibles y eficientes. La Tabla 4.1 proporciona una comparación de las principales configuraciones de eVTOL, destacando sus características y ventajas clave.

Los helicópteros y multihélices se destacan por su capacidad de maniobra y flexibilidad en entornos urbanos, aunque tienen limitaciones en cuanto a la autonomía y la capacidad de carga.



<b>Configuración</b>	<b>Eficiencia Energética</b>	<b>Capacidad de Carga</b>	<b>Autonomía</b>	<b>Ventajas</b>
<b>Helicópteros</b>	Media	Alta	Media	Capacidad de despegue vertical en espacios reducidos; flexibilidad en operaciones de rescate y emergencia
<b>Multicópteros</b>	Alta	Baja	Baja	Excelente maniobrabilidad y control; adecuado para entornos urbanos densos y servicios de taxi aéreo
<b>Ala Basculante</b>	Muy alta	Media	Alta	Alta eficiencia en vuelo horizontal; adecuada para vuelos de mayor distancia y carga moderada
<b>Hélice Basculante</b>	Alta	Media	Alta	Buena transición entre vuelo vertical y horizontal; flexibilidad en operaciones
<b>Ventilador Basculante</b>	Alta	Media	Alta	Reducción de ruido; ideal para aplicaciones urbanas sensibles al ruido
<b>Propulsión Separada</b>	Alta	Alta	Muy alta	Optimización de sistemas para cada fase del vuelo; mejora la eficiencia y autonomía
<b>Rotor de Velocidad Reducida</b>	Alta	Alta	Alta	Combinación de eficiencia aerodinámica con capacidad de despegue vertical; ideal para operaciones de media distancia
<b>Propulsión Mixta</b>	Media	Alta	Alta	Flexibilidad en el uso de motores para diferentes fases del vuelo; equilibrio entre eficiencia y operatividad

Tabla 4.1: Comparación de características y ventajas de diferentes configuraciones de eVTOL

Los eVTOLs con alas, como los de ala basculante y hélice basculante, ofrecen una mayor eficiencia en el vuelo horizontal y son más adecuados para misiones de mayor distancia. Las configuraciones de propulsión separada y rotor de velocidad reducida combinan la eficiencia energética con la capacidad de realizar despegues verticales en espacios reducidos, lo que las hace ideales para aplicaciones tanto urbanas como interurbanas. La propulsión mixta ofrece un equilibrio óptimo entre flexibilidad y eficiencia, permitiendo la adaptación a una amplia gama de escenarios operativos.

Esta diversidad en las configuraciones de eVTOL refleja la variedad de necesidades y desafíos que enfrentan los desarrolladores y operadores de movilidad aérea urbana. Comprender las ventajas y limitaciones de cada configuración es crucial para la selección adecuada de tecnologías que puedan satisfacer las demandas específicas de la movilidad aérea en entornos urbanos.

### 4.3. Propuestas y conceptos eVTOL.

#### 4.3.1. Lilium Jet.

Lilium es una empresa pionera en el campo de la movilidad aérea urbana que se ha destacado por su enfoque innovador en el diseño y desarrollo de aviones eVTOL. La compañía se fundó en 2015 en Alemania con el objetivo de revolucionar el transporte aéreo y brindar una solución de movilidad sostenible y eficiente.

Lilium Jet, la aeronave insignia de Lilium, presenta una configuración de siete plazas que combina diseño aerodinámico avanzado, propulsión eléctrica y tecnología de empuje vectorial. Este concepto cuenta con una arquitectura de ala fija y se equipa con 36 ventiladores eléctricos de empuje vectorial (DEVT) distribuidos en sus alas y fuselaje, el Lilium Jet ofrece un vuelo silencioso y eficiente. Con una velocidad de crucero de 280 km/h y un alcance de más de 250 km, el Lilium Jet se presenta como una opción rápida, segura y respetuosa con el medio ambiente para el transporte urbano.

Esta combinación de velocidad y autonomía lo convierte en una opción viable para viajes rápidos y eficientes no solo en el transporte urbano, sino también en el regional.



Figura 4.3: Lilium Jet concept. Fuente: [Lilium]

Por otro lado, la compañía también ha explorado alternativas de carga considerando el potencial de este segmento de aeronaves para el transporte de mercancías. Esto podría ofrecer soluciones logísticas más rápidas y eficientes, especialmente en áreas urbanas congestionadas.

En cuanto a las últimas noticias, Lilium ha estado trabajando activamente en la implementación de su visión de movilidad aérea urbana. La empresa ha realizado pruebas exitosas de vuelo con prototipos de su avión eVTOL, demostrando su capacidad para despegar, volar y aterrizar de manera segura. Además, Lilium ha estado colaborando con socios estratégicos y autoridades reguladoras para garantizar la integración segura de sus aviones en el espacio aéreo existente.

Concepto	Capacidad	Velocidad	Autonomía	Propulsión	MTOW	Certificación
Lilium	7 pax	250 km/h	250 km	DEVT	3.175 kg	2024

Tabla 4.2: Lilium Jet: Especificaciones técnicas. Fuente: [eVTOLnews, b]

#### 4.3.2. Joby Aviation.

Fundada en 2009, Joby ha estado a la vanguardia de la industria y ha demostrado un compromiso sólido con la creación de soluciones de transporte aéreo sostenibles y eficientes.

Joby ha presentado su propuesta de eVTOL, conocida como Joby eVTOL, que se ha diseñado con el objetivo de proporcionar un transporte rápido, silencioso y accesible dentro de áreas urbanas. Este avión cuenta con un diseño de ala fija y está impulsado por una combinación de motores eléctricos y un sistema de propulsión por hélice. Estos motores eléctricos permiten el despegue y el aterrizaje vertical, así como la transición a un vuelo de crucero eficiente.

La capacidad de pasajeros de Joby eVTOL es impresionante, ya que puede acomodar hasta cuatro pasajeros, incluido el piloto. La cabina ha sido diseñada para brindar comodidad y seguridad a los ocupantes, con características como asientos ergonómicos y sistemas de seguridad avanzados.



Figura 4.4: Joby S4 concept. Fuente: [Aviation]

En cuanto a los parámetros de funcionamiento, Joby eVTOL ha demostrado un rendimiento excepcional. Puede alcanzar velocidades de hasta 320 km/h y tiene un alcance de más de 240 km con una sola carga de batería. Estas capacidades permiten viajes rápidos y eficientes, tanto dentro de las ciudades como en distancias más largas en áreas adyacentes.

Joby también ha considerado aplicaciones más allá del transporte de pasajeros. La empresa ha explorado oportunidades en el campo de la entrega de carga, lo que podría facilitar la distribución de mercancías de manera más rápida y eficiente en entornos urbanos.

En cuanto a las últimas noticias, Joby ha estado trabajando activamente en el desarrollo y la certificación de su avión eVTOL. La empresa ha completado con éxito pruebas de vuelo y ha establecido asociaciones estratégicas con importantes actores de la industria y autoridades regulatorias. Estas colaboraciones respaldan la visión de Joby de proporcionar una solución de movilidad aérea urbana segura y eficiente.

En resumen, Joby es una empresa líder en el campo de la movilidad aérea urbana, con su propuesta Joby eVTOL. Con su diseño de ala fija, capacidad para cuatro pasajeros, rendimiento excepcional y enfoque en la sostenibilidad, Joby está comprometida en ofrecer soluciones de transporte aéreo innovadoras y accesibles. Con pruebas exitosas de vuelo y colaboraciones estratégicas, Joby está bien posicionada para desempeñar un papel significativo en la transformación de la movilidad urbana.

Concepto	Capacidad	Velocidad	Autonomía	Propulsión	MTOW	Certificación
Joby S4	5 pax	322 km/h	241 km	Vectored thrust	2.177 kg	2025

Tabla 4.3: Joby Aviation S4: Especificaciones técnicas. Fuente: [Aviation]

### 4.3.3. Wisk Aero.

Wisk es una empresa líder en el desarrollo de aeronaves eVTOL para la movilidad aérea urbana. Esta empresa conjunta entre Boeing y Kitty Hawk Corporation se ha establecido como un actor destacado en el sector, con una visión clara de crear soluciones de transporte aéreo avanzadas y sostenibles.

La propuesta de eVTOL de Wisk, conocida como Wisk Cora, ha sido diseñada para revolu-

cionar la forma en que nos desplazamos en áreas urbanas. Con una configuración de ala fija y propulsión eléctrica, Cora ofrece un vuelo silencioso, eficiente y seguro.

Wisk Cora tiene capacidad para transportar a dos pasajeros y opera de manera completamente autónoma, eliminando la necesidad de un piloto. Su diseño aerodinámico y su avanzado sistema de control de vuelo le permiten realizar despegues y aterrizajes verticales, así como vuelos en crucero eficientes.



Figura 4.5: Wisk Cora concept. Fuente: [Wisk]

En cuanto a los parámetros de funcionamiento, Wisk Cora puede alcanzar velocidades de hasta 180 km/h y tiene un alcance de aproximadamente 40-50 km. Estas características lo convierten en una opción ideal para trayectos cortos dentro de áreas urbanas y suburbanas.

Además del transporte de pasajeros, Wisk también está explorando aplicaciones en el campo de la entrega de carga. Su enfoque en la eficiencia y la sostenibilidad se traduce en la capacidad de Cora para ofrecer soluciones rápidas y eficientes en la distribución de bienes en entornos urbanos.

En términos de últimas noticias, Wisk ha estado trabajando en colaboración con socios estratégicos y autoridades reguladoras para avanzar en el desarrollo y la certificación de su aeronave eVTOL. La empresa ha realizado pruebas de vuelo exitosas y ha demostrado su compromiso con la seguridad y la innovación en la movilidad aérea urbana.

Con su enfoque en la autonomía, la eficiencia y la seguridad, Wisk está desempeñando un papel importante en la transformación de la forma en que nos desplazamos en áreas urbanas. Con pruebas exitosas y colaboraciones estratégicas, Wisk está posicionada para desempeñar un papel destacado en el futuro de la movilidad aérea.

Concepto	Capacidad	Velocidad	Autonomía	Propulsión	MTOW	Certificación
Wisk Aero 6	4 pax	267 km/h	144 km	Lift+Cruise	- kg	-

Tabla 4.4: Wisk Aero Gen 6: Especificaciones técnicas. Fuente: [Wisk]

#### 4.3.4. Dufour Aerospace.

Dufour Aerospace es una empresa innovadora que se dedica al desarrollo de aeronaves eVTOL de alto rendimiento. Con sede en Suiza, la compañía se esfuerza por proporcionar soluciones avanzadas de movilidad aérea para el transporte urbano.

La propuesta de eVTOL de Dufour Aerospace, llamada Dufour eVTOL, es un avión de ala fija que combina la capacidad de despegue y aterrizaje vertical con un vuelo eficiente en crucero. Diseñado para ofrecer una experiencia de vuelo segura y emocionante, el Dufour eVTOL es capaz de transportar a cuatro pasajeros, incluido el piloto.



Figura 4.6: Dufour Aero 3 concept. Fuente: [Dufour].

La arquitectura del Dufour eVTOL se basa en un sistema de propulsión eléctrica que impulsa los rotores principales para el despegue y el aterrizaje vertical. Una vez en el aire, el avión cambia a un vuelo en crucero propulsado por un motor de combustión interna y una hélice trasera. Esta configuración híbrida permite un vuelo eficiente y un mayor alcance.

El Dufour eVTOL ofrece una combinación única de velocidad y alcance, proporcionando velocidades de hasta 300 km/h y una autonomía de aproximadamente 800 km. Estas características lo convierten en una opción ideal para viajes de larga distancia dentro de áreas urbanas y regionales.

Además del transporte de pasajeros, Dufour Aerospace también está explorando aplicaciones en el ámbito de los servicios de emergencia y la carga aérea. El diseño versátil del Dufour eVTOL y su capacidad de operar desde pistas cortas lo convierten en una herramienta valiosa para este tipo de misiones.

En lo referente a sus últimas novedades, Dufour Aerospace ha estado trabajando arduamente en el desarrollo y la certificación de su aeronave eVTOL. La empresa ha realizado pruebas de vuelo exitosas y ha recibido el respaldo de inversores y socios estratégicos que reconocen el potencial de su tecnología.

Concepto	Capacidad	Velocidad	Autonomía	Propulsión	MTOW	Certificación
Dufour Aero 3	8 pax	350 km/h	1,020 km	Vectored Thrust	2.800 kg	2026

Tabla 4.5: Dufour Aero 3: Especificaciones técnicas. Fuente: [Dufour].

#### 4.3.5. Volocopter.

Volocopter es una empresa pionera en el desarrollo de aeronaves eVTOL para la movilidad aérea urbana. Con sede en Alemania, la compañía se ha destacado por su enfoque en la seguridad, la sostenibilidad y la accesibilidad en el transporte aéreo.

La propuesta de eVTOL de Volocopter es conocida como el Volocopter 2X. Se trata de una aeronave eléctrica de despegue y aterrizaje vertical diseñada para transportar a dos pasajeros de manera cómoda y segura, que basa su diseño en una estructura de rotor multirrotor y su comportamiento aerodinámico, ofreciendo una experiencia de vuelo suave y silenciosa.

La arquitectura del Volocopter 2X se basa en 18 rotores eléctricos distribuidos en su estructura circular. Estos rotores proporcionan la sustentación y la propulsión necesarias para el despegue, el aterrizaje y el vuelo en crucero. La aeronave está equipada con sistemas redundantes para garantizar un alto nivel de seguridad en todas las fases del vuelo.



Figura 4.7: Volocopter Volocity concept. Fuente: [Volocopter]

En cuanto a sus especificaciones, el Volocopter 2X cuenta con una autonomía de vuelo de aproximadamente 35 kilómetros y una velocidad de crucero de alrededor de 70 km/h. Además del transporte de pasajeros, Volocopter también está explorando aplicaciones en el campo de la logística y el transporte de carga, ofreciendo una solución versátil y eficiente para la entrega de mercancías en áreas urbanas congestionadas.

Adicionalmente a sus prototipos, Volocopter ha realizado con éxito pruebas de vuelo con su aeronave Volocopter 2X, obteniendo importantes certificaciones de seguridad. La empresa ha establecido asociaciones estratégicas con actores clave de la industria y ha recibido inversiones significativas para continuar avanzando en el desarrollo de su tecnología.

Concepto	Capacidad	Velocidad	Autonomía	Propulsión	MTOW	Certificación
Volocopter 2X	2 pax	102 km/h	27 km	Multicopter	450 kg	2025

Tabla 4.6: Volocopter 2X: Especificaciones técnicas. Fuente: [eVTOLnews, c].

#### 4.3.6. Vertical Aerospace.

Vertical Aerospace es una empresa con sede en el Reino Unido que se dedica al diseño y desarrollo de aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL). La compañía se ha comprometido a revolucionar la movilidad aérea urbana con soluciones avanzadas y sostenibles.

La propuesta de eVTOL de Vertical Aerospace se conoce como el VX4. Este innovador vehículo aéreo cuenta con una capacidad para transportar hasta cuatro pasajeros, lo que lo convierte en una opción ideal para servicios de transporte aéreo compartido en entornos urbanos.

La arquitectura de diseño del VX4 se basa en una configuración de cuatro rotores principales distribuidos en una estructura aerodinámica de ala fija. Estos rotores eléctricos permiten el despegue y el aterrizaje vertical, así como la transición a un vuelo en crucero eficiente. El VX4 también incorpora características de seguridad y redundancia para garantizar la confiabilidad y la protección de los pasajeros.



Figura 4.8: Vertical VX4 concept. Fuente: [Vertical].

En cuanto a los parámetros de funcionamiento, el VX4 tiene una autonomía de vuelo de aproximadamente 160 kilómetros y una velocidad máxima de alrededor de 240 km/h, viajes de mediana distancia el tipo de misión más adecuado a sus especificaciones y ofreciendo una experiencia de vuelo rápida y eficiente.

De igual forma a sus competidores, Vertical Aerospace también está explorando aplicaciones en el ámbito del transporte de carga y la logística proporcionando una plataforma versátil para la entrega de mercancías en áreas urbanas congestionadas, lo que contribuye a la optimización de las operaciones logísticas.

Vertical Aerospace ha logrado importantes avances en el desarrollo de su tecnología eVTOL. La empresa ha realizado exitosas pruebas de vuelo con el VX4 y ha obtenido certificaciones de seguridad relevantes. Además, Vertical Aerospace ha establecido alianzas estratégicas con socios clave de la industria y ha recibido inversiones significativas para continuar impulsando la evolución de la movilidad aérea urbana.

En resumen, Vertical Aerospace se destaca como una empresa líder en el campo de los eVTOL con su aeronave VX4. Con un enfoque en la eficiencia, la sostenibilidad y la seguridad, Vertical Aerospace trabaja para transformar la movilidad urbana, ofreciendo soluciones avanzadas y sostenibles para la movilidad aérea del futuro.

Concepto	Capacidad	Velocidad	Autonomía	Propulsión	MTOW	Certificación
Vertical VX4	5 pax	241 km/h	161 km	Vectored Thrust	-	2026

Tabla 4.7: Vertical VX4: Especificaciones técnicas. Fuente: [Vertical].

#### 4.3.7. eHang.

eHang es una empresa pionera en la industria de la movilidad aérea urbana con sede en China, y que principalmente se ha destacado por su visión innovadora y su compromiso con la creación de soluciones de transporte aéreo revolucionarias.

La propuesta de eVTOL de eHang se conoce como el eHang 216. Este vehículo aéreo autónomo tiene capacidad para transportar a dos pasajeros a través de una configuración de 16 rotores que permiten el despegue y aterrizaje vertical, lo que lo hace ideal para operar en áreas urbanas congestionadas.

La arquitectura de diseño del eHang 216 se basa en la combinación de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y la conectividad 5G, que permiten un control autónomo del vehículo. Esto significa que el eHang 216 puede volar de forma autónoma, sin necesidad de un piloto a bordo, que cuenta con sistemas de seguridad redundantes y está diseñado para resistir condiciones climáticas adversas.



Figura 4.9: eHang 216 concept. Fuente: [eHang].

En términos de parámetros de funcionamiento, el eHang 216 tiene una velocidad máxima de alrededor de 130 km/h y una autonomía de vuelo de hasta 35 minutos. Estas características

lo convierten en una opción adecuada para vuelos cortos y trayectos urbanos, ofreciendo una alternativa rápida y eficiente al transporte terrestre convencional.

Además del transporte de pasajeros, eHang también ha explorado aplicaciones en áreas como el transporte de carga y servicios de emergencia. El diseño modular del eHang 216 permite adaptar su configuración para satisfacer diferentes necesidades y escenarios de uso, lo que amplía su versatilidad y utilidad en diversos contextos.

En las últimas noticias, eHang ha logrado importantes hitos en el desarrollo y la adopción de su tecnología eVTOL. La compañía ha llevado a cabo pruebas de vuelo exitosas en diferentes ubicaciones y ha obtenido certificaciones de seguridad para sus aeronaves. Además, eHang ha establecido alianzas estratégicas con socios globales y ha iniciado proyectos piloto en varias ciudades para demostrar la viabilidad y el potencial de su tecnología.

Concepto	Capacidad	Velocidad	Autonomía	Propulsión	MTOW	Certificación
eHang 216	2 pax	130 km/h	35 km	Multirroto	-	-

Tabla 4.8: eHang 216: Especificaciones técnicas. Fuente: [eVTOLnews, a].



# Capítulo 5

## Estimación de la demanda

Al igual que los aeropuertos, el dimensionamiento de la infraestructura debe realizarse tomando como referencia unos parámetros de diseño, principalmente dados por la demanda de pasajeros a atender por las instalaciones. Para ello, es necesario realizar una estimación del potencial tráfico de pasajeros y evolución de la demanda que podría atender estas instalaciones, además de la clasificación de potenciales localizaciones en el entorno urbano para albergarla. En este aspecto, es necesario observar las distintas zonas que concentran los mayores problemas relacionados con la congestión del tráfico, afluencia de personas y densidad de población en el entorno urbano de Valencia. Con ello, y de acuerdo a las especificaciones técnicas ofrecidas previamente por los diferentes conceptos de diseño ofrecidos por los distintos fabricantes, este capítulo muestra los diferentes tipos de misión realizables por los eVTOL como respuesta a un servicio de taxi aéreo para la ciudad de Valencia, entre los que podemos distinguir diferentes tipos de operación.

### 5.1. Definición de los tipos de misión.

En este apartado, nos adentraremos en la clasificación de las misiones de vuelo eVTOL en la ciudad de Valencia, dividiéndolas en dos categorías principales según su distancia y servicio. La segmentación en relación a la distancia de operación viene fundamentada por la autonomía proporcionada por los diferentes fabricantes líderes en la industria de eVTOLs descritos en el apartado anterior, mientras que la distribución según su servicio atiende a la motivación que justifica el trayecto.

El propósito de esta subdivisión es comprender y categorizar las operaciones de vuelo eVTOL en función de las distancias de vuelo, las necesidades de recarga de energía y su objetivo. En lo correspondiente a la distancia, al establecer las misiones de corto, medio y largo alcance, será posible desarrollar estrategias más específicas para satisfacer las demandas de pasajeros en cada categoría, optimizar la infraestructura y los servicios requeridos.

#### 5.1.1. Misión de corto radio.

El tipo de misión de corto alcance se centra en ofrecer un alto número de trayectos basando su operación en el transporte urbano entre una red de puntos distribuida en el área metropolitana sin realizar grandes periodos de recarga entre operaciones. Las aeronaves eVTOL diseñadas para este tipo de misión tienen una autonomía adecuada para realizar múltiples trayectos sin necesidad de recargas prolongadas entre operaciones. Esto se debe a que la demanda de pasajeros en áreas urbanas densamente pobladas requiere una frecuencia de vuelos elevada y una capacidad de transporte eficiente.

La misión de corto alcance tiene como objetivo principal mejorar la movilidad urbana al proporcionar un transporte rápido y eficiente en áreas congestionadas como consecuencia de

una alta demanda de desplazamientos. Los vuelos eVTOL podrían conectar diferentes distritos de Valencia, ofreciendo una alternativa a los medios de transporte terrestres tradicionales y reduciendo la congestión en las vías. Además, esta misión podría atender las necesidades de movilidad de los residentes y visitantes que requieren desplazarse a destinos cercanos, como lugares de trabajo, centros comerciales, estaciones de transporte público, hospitales y zonas turísticas dentro de la ciudad.

Para estimar la demanda de pasajeros en la misión de corto alcance en Valencia, se deben considerar varios factores, como el tamaño de la población, la densidad urbana, los patrones de viaje existentes y las necesidades de movilidad de los ciudadanos. El análisis de estos datos permitirá proyectar la demanda potencial de vuelos eVTOL y determinar la capacidad requerida para satisfacerla de manera eficiente.



Figura 5.1: Rango de operación para un radio de 10 *km*.

Como puede observarse en la Figura 5.1, se ha estimado un radio de operación de 10 *km* desde el centro de la ciudad con el objetivo de satisfacer la misión definida. Atendiendo a la mejora de la movilidad urbana, se proponen dos tipos principales de servicios para este tipo de operación:

- **Commuting.** Incrementar la fluidez del tráfico y descongestionar las principales vías de comunicación en el tránsito urbano con el objetivo de aliviar la densidad de circulación durante las horas pico desde las diferentes poblaciones circundantes hacia el núcleo urbano, y viceversa.
- **Airport Shuttle.** Este tipo de operación surge como una oportunidad intermodal para dar servicio a la conexión entre el aeropuerto de Valencia y el centro urbano de la capital. Permitiría el establecimiento de un servicio regular para atender este tipo de tráfico desde diferentes puntos de la ciudad y reducir los tiempos del trayecto actual mediante transporte rodado o público.

Para conocer en detalle la introducción de ambos servicios, será necesario llevar a cabo un análisis del tráfico, movilidad y demografía tanto de Valencia como los municipios adyacentes, el cual se desarrolla en los capítulos posteriores.

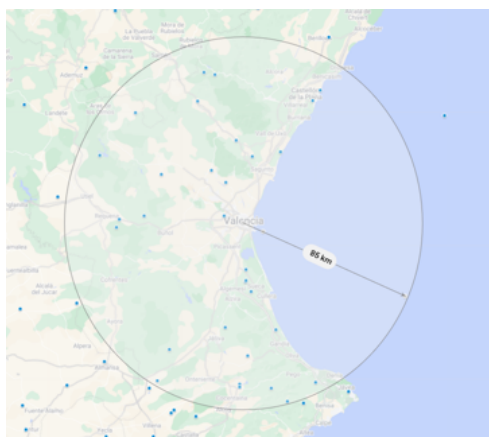
### 5.1.2. Medio y largo alcance.

El tipo de misión de medio y largo alcance se encuentra mayormente orientado al turismo y busca ofrecer un transporte basado en la realización de un trayecto equivalente o cercano a los valores estimados de autonomía total de la aeronave y, posteriormente, realizar un estacionamiento de mayor duración relacionado con la recarga del sistema de almacenamiento. Las

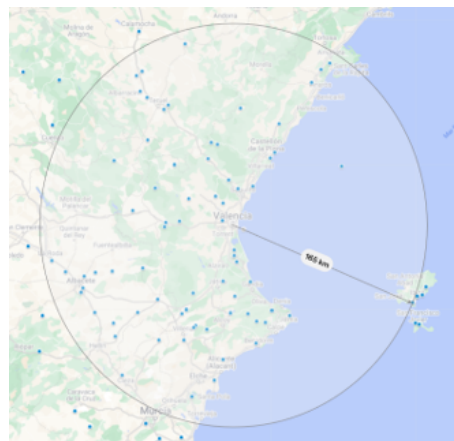
aeronaves eVTOL diseñadas para este tipo de misión tienen una autonomía mayor que les permite cubrir distancias más largas, pero requieren planificar las paradas para recargar energía en destinos estratégicos o en puntos intermedios.

Para la caracterización de este tipo de operaciones, se ha establecido una diferenciación de la misión según la distancia del trayecto a operar atendiendo a los siguientes criterios:

- **Medio alcance.** Entre 10 y 85 *km*.
- **Largo alcance.** Entre 85 y 165 *km*.



(a) Rango de operación para  $r = 85 \text{ km}$ .



(b) Rango de operación para  $r = 165 \text{ km}$ .

Figura 5.2: Rango de operación para las misiones de medio y largo alcance.

El propósito de las misiones de medio radio reside en el empleo de aeronaves eVTOL como medio alternativo para viajar a destinos turísticos y ciudades situadas en la proximidad de la localización de origen, ofreciendo a los pasajeros una experiencia de viaje rápida y conveniente.

A diferencia del corto radio, la metodología aplicable para la estimación de la demanda de medio alcance debe tener en cuenta factores como el turismo, desplazamientos frecuentes en la zona y estacionalidad de la demanda.

## 5.2. Identificación de localizaciones potenciales.

En este apartado se llevará a cabo la identificación de emplazamientos potenciales para el vertipuerto en la ciudad de Valencia, considerando la información proporcionada sobre los tipos de misión de los vuelos eVTOL. El objetivo es determinar la zona más adecuada para ubicar el vertipuerto, teniendo en cuenta factores como la conectividad con el transporte terrestre, la demanda de pasajeros y la infraestructura existente. Tras analizar los tipos de misión, en particular la misión de corto alcance, se han evaluado diversas ubicaciones potenciales en Valencia.

Para ello, se ha realizado un estudio de los núcleos de la ciudad de Valencia que representan una mayor concentración de personas y puntos de interés con mayor afluencia de visitas, de acuerdo a los datos proporcionados por las estadísticas de turismo de la ciudad [Valencia, 2022]. Se analizarán diversas opciones y se evaluará su idoneidad como posibles emplazamientos para el vertipuerto. A continuación, se presentan las siguientes posibilidades: Universidades, Terminal portuaria de pasajeros, Ciudad de las Artes y las Ciencias, Mestalla y Joaquín Sorolla.

### 5.2.1. Análisis de las localizaciones propuestas.

- **Universidades:** Esta zona urbana se corresponde con la región noreste de la ciudad en la cual se encuentran situadas la Universidad de Valencia y la Universidad Politécnica

de Valencia. Este área adquiere gran importancia al consistir en centros de actividad con una alta concentración de estudiantes, profesores y personal administrativo. Esta zona cuenta con una infraestructura de transporte público desarrollada, lo que la convierte en una opción interesante para el vertipuerto. Sin embargo, debido a la estacionalidad de la demanda de pasajeros la zona, podría haber períodos de menor actividad durante los meses de verano y vacaciones académicas, así como una ubicación periférica para permitir un servicio de taxi aéreo accesible desde el centro urbano.

- **Terminal portuaria de pasajeros:** La terminal portuaria de pasajeros en Valencia es un punto de entrada y salida para turistas y visitantes de la ciudad. Esta ubicación cuenta con una infraestructura de transporte marítimo bien desarrollada y una conexión directa con el centro urbano. El vertipuerto en esta zona podría servir como una opción conveniente para habilitar conexiones orientadas a un perfil de pasajeros de estilo vacacional que desean desplazarse rápidamente a otros destinos dentro de la ciudad. Sin embargo, es importante considerar la capacidad y las restricciones operativas del puerto en términos de espacio y seguridad.
- **Ciudad de las Artes y las Ciencias:** La Ciudad de las Artes y las Ciencias es un importante complejo cultural y de entretenimiento en Valencia el cual atrae a una gran cantidad de turistas y visitantes. Esta zona cuenta con una infraestructura turística desarrollada y una ubicación estratégica dentro del entorno urbano. Establecer el vertipuerto en esta área podría facilitar el acceso rápido y eficiente a la Ciudad de las Artes y las Ciencias, así como a otros lugares de interés turístico cercanos. Sin embargo, la capacidad de la zona para albergar este tipo de infraestructura debería ser analizada, así como su capacidad para gestionar el flujo de pasajeros adicionales.
- **Mestalla:** El estadio de Mestalla describe uno de los lugares emblemáticos en la ciudad debido a su alta afluencia de personas en el ámbito de eventos deportivos. Esta ubicación cuenta con una excelente conectividad con el transporte terrestre y una buena infraestructura de acceso. Establecer el vertipuerto en esta zona podría brindar una opción conveniente para los aficionados al fútbol y otros eventos que se llevan a cabo en el estadio. Sin embargo, debido a la naturaleza de sus instalaciones, la implementación de un vertipuerto en este área se ajustaría en mejor medida dentro de una red de conexiones y no como hub principal de la ciudad.
- **Joaquín Sorolla:** La estación de Joaquín Sorolla es la principal estación de tren en Valencia y se encuentra estratégicamente ubicada en el centro urbano. Esta localización presenta ventajas significativas, como una excelente conectividad con el transporte terrestre, infraestructura existente y una alta demanda potencial de vuelos eVTOL debido a la concentración de personas en el área circundante. Además, aprovechar la infraestructura existente reduciría los costos de construcción y aceleraría la implementación del vertipuerto. No obstante, resulta preciso el análisis de superficies disponibles para la planificación de las instalaciones necesarias.

### 5.2.2. Selección de la ubicación objetivo.

Una vez analizadas las diferentes propuestas de manera individual, se ha procedido a determinar la localización objetivo en base a los siguientes criterios: concentración de personas, estacionalidad de la demanda, conexión con el transporte terrestre, ubicación céntrica, infraestructura existente e intermodalidad.

Tras evaluar todas las opciones, se ha concluido que la zona correspondiente a la estación de Joaquín Sorolla se determina como la mejor posibilidad para ubicar el vertipuerto en Valencia. Su ubicación céntrica, excelente conectividad con el transporte terrestre, infraestructura existente y la alta demanda potencial de vuelos eVTOL en la zona respaldan esta elección. Además, aprovechar la posibilidad de aprovechar determinados factores de la infraestructura existente en

la estación de Joaquín Sorolla proporcionaría una solución eficiente y rentable para implementar el vertipuerto en la ciudad de Valencia.

Finalmente, una vez definida la ubicación objetivo para la implementación del vertipuerto atendiendo a los criterios mencionados, así como a los perfiles de misión planteados para las operaciones eVTOL en la ciudad, el proyecto prosigue el estudio de la demanda a través del análisis de la movilidad y demografía en la ciudad de Valencia para alcanzar una estimación de la demanda como requisito de diseño.

### **5.3. Análisis de la movilidad urbana y demografía en Valencia.**

En este apartado, se llevará a cabo un análisis demográfico y de movilidad urbana en la ciudad de Valencia, con el objetivo de conocer en detalle las necesidades y viabilidad de los diferentes perfiles de misión definidos anteriormente. Este análisis proporcionará información clave sobre la distribución de la población, los patrones de movilidad y las características de desplazamiento en la ciudad, permitiéndonos evaluar la demanda potencial y la idoneidad de los vuelos eVTOL en cada tipo de misión.

Al comprender las características demográficas de la ciudad, como la densidad de población, podremos identificar las zonas con mayor concentración de personas y evaluar la demanda esperada para los vuelos eVTOL. Asimismo, el análisis de la movilidad urbana nos permitirá comprender los patrones de desplazamiento de los residentes, los modos de transporte utilizados, los horarios de desplazamiento y otros aspectos que influirán en la viabilidad de los vuelos eVTOL.

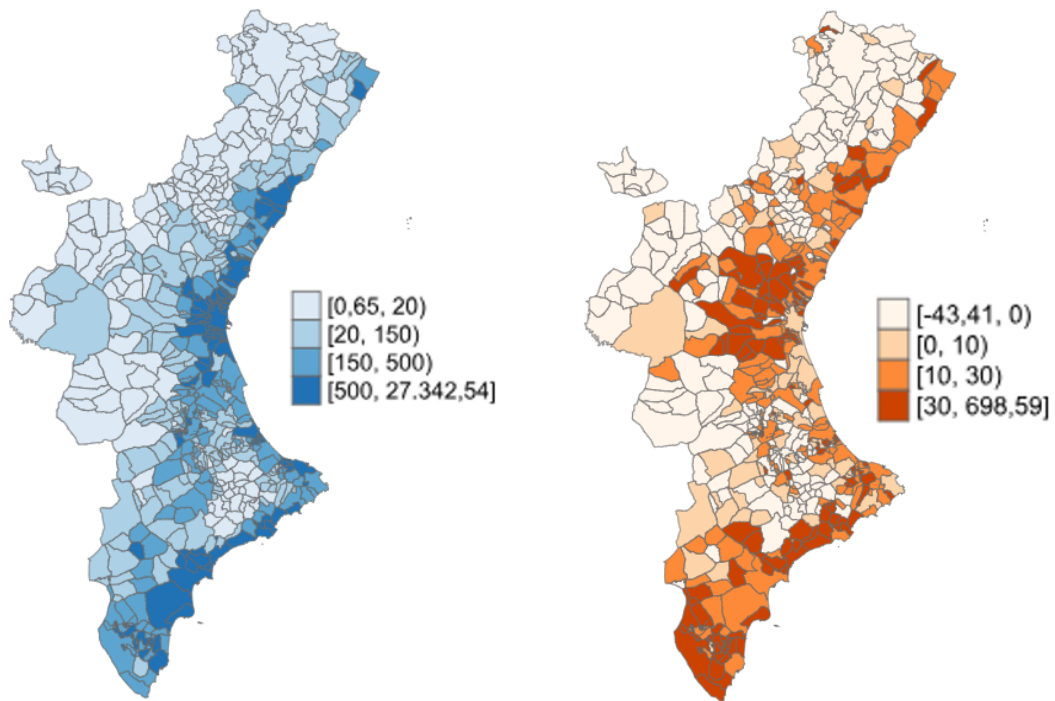
Este estudio nos brindará una visión integral de las necesidades de transporte en Valencia y nos ayudará a determinar la idoneidad de los vuelos eVTOL en términos de su capacidad para complementar o mejorar el sistema de transporte existente. Además, nos permitirá evaluar la infraestructura y la intermodalidad necesarias para respaldar los diferentes perfiles de misión, garantizando una implementación eficiente y exitosa de los vuelos eVTOL en la ciudad.

De esta forma, el análisis demográfico y de movilidad urbana nos proporcionará información crucial para comprender las necesidades y viabilidad de los diferentes perfiles de misión de los vuelos eVTOL en la ciudad de Valencia. Este conocimiento nos permitirá tomar decisiones informadas y diseñar estrategias adecuadas para satisfacer las demandas de movilidad de los residentes y visitantes de la ciudad de manera efectiva.

#### **5.3.1. Análisis demográfico.**

En primer lugar, se abordará un análisis de la situación demográfica de la provincia de Valencia. Esta observación permitirá observar aquellos municipios y localidades que presentan no solo un mayor índice de densidad de población, si no además un mayor crecimiento en los próximos años. Con ello, se busca identificar las áreas de alta concentración urbana para observar sus patrones de tráfico y transporte en las conexiones a Valencia.

De acuerdo con lo esperado, la Figura 5.3a refleja cómo las zonas de mayor densidad de población son aquellas situadas en las proximidades de las ciudades de Valencia, Alicante y Castellón. Este patrón es común en las cercanías de los principales núcleos urbanos, donde la extensión y el crecimiento de las grandes ciudades terminan anexionando los municipios adyacentes al área metropolitana.



(a) Densidad de población por  $km^2$ . (b) Crecimiento demográfico 2002-2021.

Figura 5.3: Análisis demográfico de la Comunidad Valenciana.Fuente: [IVE, b].

De las tres zonas descritas con mayor densidad de población, este proyecto centrará su estudio en la ciudad de Valencia y, por lo tanto, se ha procedido al análisis demográfico de la misma reflejado en la Figura 5.4.

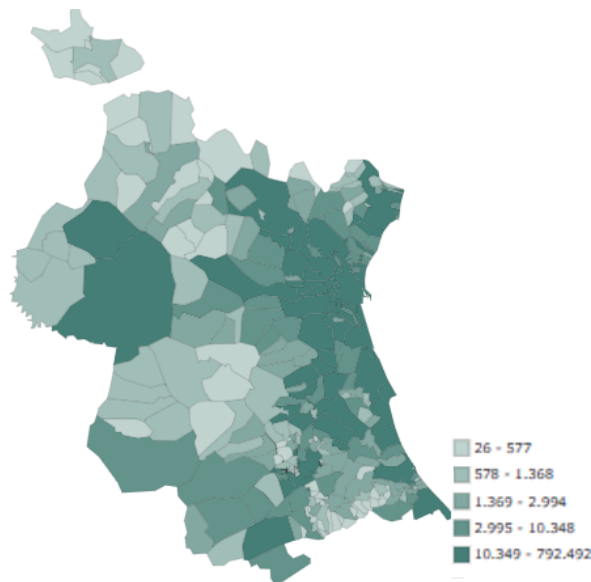


Figura 5.4: Población de los municipios en la provincia de Valencia. Fuente: [IVE, b].

De esta forma, se ha procedido a la identificación de los municipios con mayor número de habitantes dentro de la provincia de Valencia. Para ello, se ha centrado el foco en aquellas localidades que presentan un número superior a 30.000 habitantes, según los datos proporcionados por el *Instituto Nacional de Estadística*, y que se encuentran reflejados en la Tabla 5.1:

Rk	Municipio	Habitantes
1	Valencia	792.492
2	Torrent	85.142
3	Gandía	75.911
4	Paterna	71.880
5	Sagunt/Sagunto	68.066
6	Alzira	45.451
7	Mislata	44.282
8	Burjassot	38.880
9	Ontinyent	35.946
10	Aldaia	32.656
11	Manises	31.170
12	Xirivella	30.326

Tabla 5.1: Municipios con más de 30.000 habitantes en la provincia de Valencia. Fuente: [INE].

De acuerdo con lo mencionado en el Punto 2.2, el área metropolitana de Valencia será la zona que mayor problemas de congestión y movilidad urbana presente como consecuencia del volumen de población que alberga con aproximadamente 800.000 habitantes. Tomando la movilidad aérea como solución de referencia a estos problemas, la aplicación de este proyecto al área metropolitana reside en el posible establecimiento de una red de vertipuertos urbanos que permitan conectar los principales puntos neurálgicos de la ciudad.

Además, el crecimiento demográfico y el aumento en el número de habitantes en las localidades adyacentes, hacen de la conexión de estos municipios con la ciudad el principal reto para la movilidad aérea. Por ello, la solución de referencia residiría en el establecimiento de una red de *commuting* entre la periferia y el eje principal de la ciudad que permita establecer una alternativa de trayecto durante las horas de congestión.

### 5.3.2. Movilidad urbana en Valencia.

En esta subsección, se ha procedido al desarrollo de un estudio detallado sobre la movilidad urbana en la ciudad de Valencia, centrándonos en cada uno de los perfiles de misión definidos anteriormente, con el objetivo de identificar y proponer potenciales rutas para un servicio de taxi eVTOL atendiendo a las necesidades y características específicas de cada perfil. Para ello, el estudio se ha centrado principalmente en la identificación de los patrones de desplazamiento del tráfico rodado, horarios de mayor demanda y los tramos de tráfico más congestionados con el fin de identificar las rutas más apropiadas y eficientes para el servicio de taxi eVTOL.

Al analizar la movilidad urbana para cada perfil de misión, se ha tenido en cuenta la autonomía de los eVTOL y las características específicas de cada tipo de operación. Para la misión de corto alcance, se han establecido aquellos tramos de tráfico más susceptibles de experimentar congestión durante las horas pico. Este proceso ha permitido establecer el planteamiento más conveniente para conectar diferentes municipios de Valencia y optimizar la movilidad urbana en esas áreas.

Por otro lado, para las misiones de medio y largo alcance, se han considerado las rutas turísticas y los destinos de interés cercanos a Valencia, analizando la demanda de transporte hacia esos destinos y su estacionalidad, con el objetivo de establecer una tasa de referencia correspondiente a la demanda para las diferentes rutas potenciales.

Consecuentemente, se ha procedido al estudio de la movilidad urbana según los siguientes servicios y perfiles de misión:

- *Commuting.*

Con el objetivo de conocer si este perfil de misión tiene cabida como solución en el caso de estudio, se ha procedido a analizar la congestión del tráfico en las conexiones de la capital con las localidades de mayor densidad de población listadas anteriormente en la Figura 5.1.

Se ha empleado la herramienta proporcionada por *Tom Tom Traffic Stats*, que permite monitorizar y acceder al estado de las vías de comunicación y acceso tomando como referencia los datos recogidos del tráfico rodado.

La muestra de estudio analizada recoge datos correspondientes al estado del tráfico durante todos los días laborables del mes de Octubre de 2022. Han sido segmentados en intervalos horarios a lo largo del día, utilizando como foco de estudio las horas del día comprendidas entre las 6:00 *am* y las 23:00 *pm*, y que representan el mayor grueso de tráfico rodado en la ciudad, dividiendo esta ventana temporal en franjas horarias con tamaño de 1 hora [TomTom, 2023b].

Para comenzar, se ha tomado una una franja horaria representativa como magnitud de referencia, siendo el tramo elegido el correspondiente al tiempo transcurrido entre las horas 8:00 y 9:00 de la mañana, de acuerdo a lo representado en la Figura 5.5.

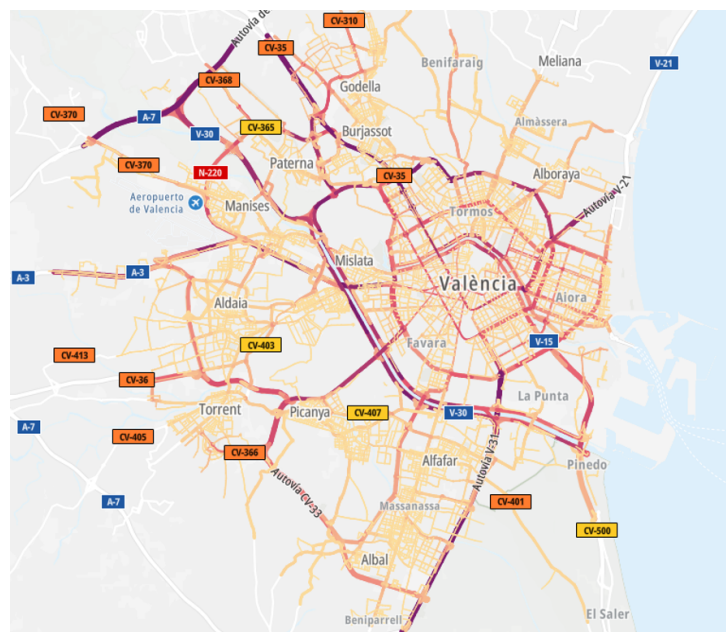


Figura 5.5: Congestión del tráfico en Valencia durante la franja horaria 8:00-9:00 de referencia. Fuente: [TomTom].

Esta figura permite establecer una primera aproximación a las zonas de mayor congestión y mayores problemas relacionados con el tráfico en la ciudad de Valencia. Como puede ser observado, las principales vías encargadas de comunicar la ciudad con los municipios del extrarradio se encuentran completamente saturadas a las horas citadas previamente. El punto que representa un mayor problema para la circulación de los vehículos se encuentra en el tramo suroeste correspondiente a la V-30. En segundo lugar, el tramo de la V-31 encargado de comunicar la ciudad de Valencia con la región sur de la provincia presenta altas densidades de tráfico seguido, en tercer lugar, por el ramal que conecta la sección noroeste de la V-30 con la autovía A-7. Ambos recorridos se ven influenciados no solo por el desplazamiento de pasajeros pertenecientes a los municipios circundantes mencionados, sino también debido al traslado de los habitantes de la capital a sus lugares de trabajo situados en los alrededores, y viceversa.

Con el objetivo de alcanzar un mayor nivel detalle sobre la evolución de la congestión del tráfico en esta zona, se ha segmentado la muestra en franjas horarias de una hora. La magnitud medida se ha otorgado en una escala relativa respecto al tramo tomado como referencia para apreciar con mayor criterio el incremento o disminución de la densidad del tráfico.



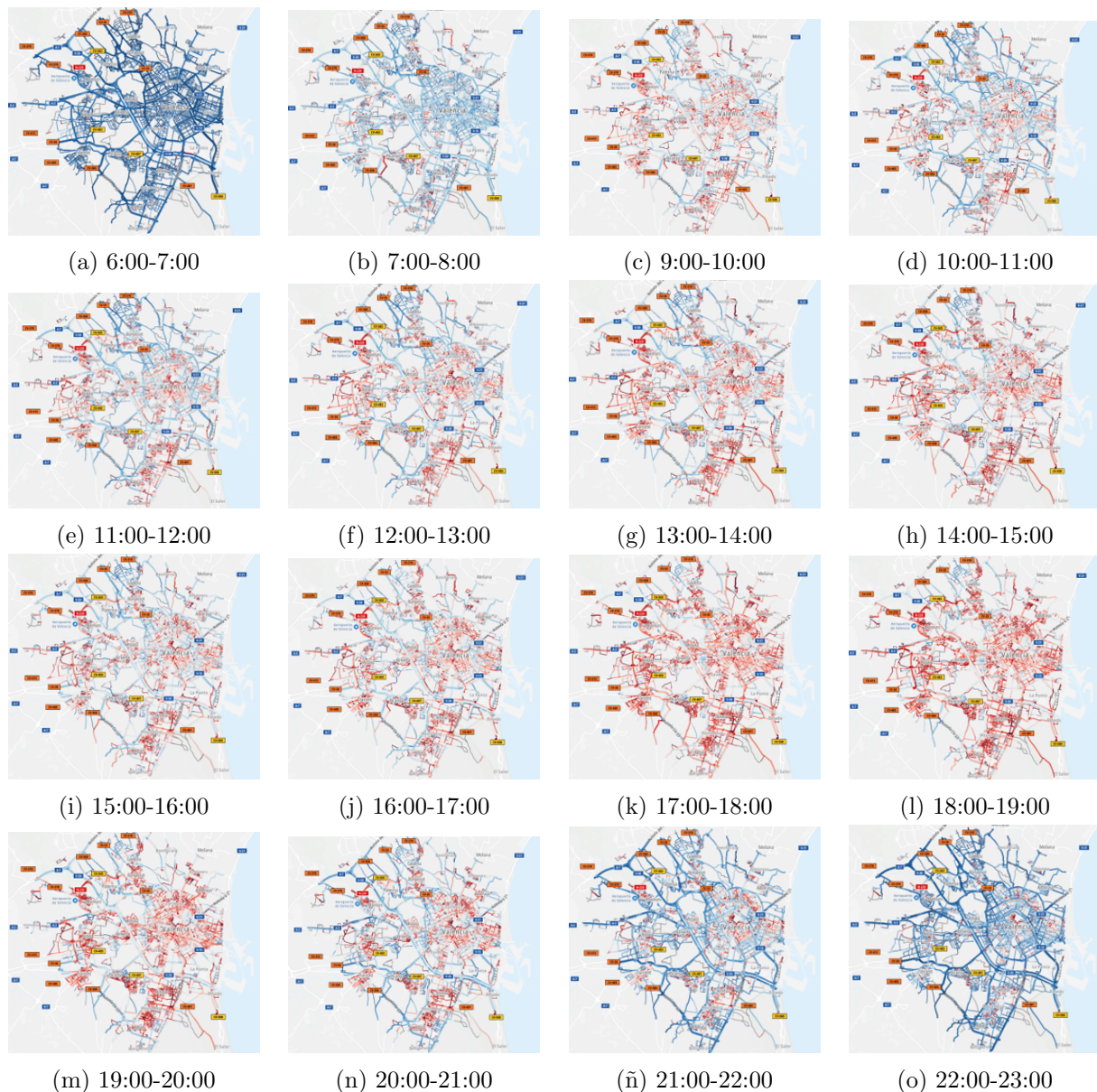


Figura 5.6: Análisis de la congestión del tráfico en Valencia en términos relativos respecto a la franja horario 8:00-9:00. Fuente: [TomTom].

Analizando los resultados reflejados en la Figura 5.6, se pueden extraer los tres intervalos horarios donde Valencia acumula una mayor concentración del tráfico en los días laborales de la semana:

- Mañana: 8 : 00 - 10 : 00 horas.
- Mediodía: 13 : 00 - 15 : 00 horas.
- Tarde: 17 : 00 - 20 : 00 horas.

En el transcurso de estas franjas horarias, existe un claro salto cuantitativo en cuanto a los datos correspondientes al tráfico y congestión respecto a otros denominados como *'horas valle'*. En cambio, dentro de las denominadas como *'horas pico'* en este estudio, las franjas horarias correspondientes a la jornada vespertina reflejan la mayor concentración de vehículos a lo largo del día, mostrando valores relativos cercanos a tres veces el número de vehículos manifestados en las horas de máxima congestión a lo largo de la mañana en las principales vías de circulación y, en algunos casos, por encima del triple dentro de la ciudad y municipios circundantes.

Es posible apreciar que los principales núcleos de congestión son localizados a lo largo de las

carreteras V-30 y V-31, así como los principales accesos a los municipios de Torrent, Aldaia, Burjassot y Manises, localizándose además en este último el aeropuerto de la ciudad.

Por lo tanto, el establecimiento de una red de *'commuting'* de taxi aéreo se justificaría como solución para satisfacer el pico de demanda que provoca la saturación en las principales vías de comunicación de la ciudad, lo cual compone el tipo de misión corta para el caso de estudio.

#### ■ **Airport Shuttle.**

Por otra parte, la saturación en el municipio de Manises viene motivado en gran medida por la presencia del aeropuerto de Valencia, quien tiene un impacto en el tráfico de pasajeros debido a los accesos circundantes a estas instalaciones. Una de las soluciones planteadas por este estudio reside en la implantación de una posible lanzadera que comunique el centro de la ciudad con el aeropuerto, aliviando la congestión en esta zona.

Consecuentemente, será preciso llevar a cabo el análisis referente a la movilidad urbana entre los puntos que compongan esta ruta. Para ello, es necesario establecer un punto de conexión definido dentro del núcleo urbano que sirva como punto de enlace con el complejo aeroportuario. Debido a su ubicación y conexiones con el resto de la ciudad, se ha seleccionado la estación de Joaquín Sorolla como potencial emplazamiento para albergar un posible vertipuerto que conecte el centro de la ciudad con el aeropuerto de Manises debido a dos principales criterios: localización y tránsito de pasajeros, de acuerdo a lo expuesto previamente en el Punto 5.2.2.

A diferencia de la posible red de *'commuting'*, este servicio alcanzaría su máxima demanda durante las jornadas correspondientes a los fin de semana debido al incremento de los desplazamientos y oferta de vuelos comerciales prevista por parte de las aerolíneas. Por lo tanto, se ha aplicado la misma metodología con el objetivo de identificar los problemas de congestión para este trayecto.

Con este objetivo, se ha analizado la muestra correspondiente al trayecto correspondiente a lo largo del fin de semana, haciendo especial hincapié en las horas de mayor densidad de tráfico de acuerdo a los siguientes intervalos:

- Viernes 17:00-23:00. Trayecto Joaquín Sorolla-Aeropuerto de Manises.  
Tiempo medio de trayecto [s]: 25 *mins*.
- Domingo 17:00-23:00. Trayecto Aeropuerto de Manises-Joaquín Sorolla.  
Tiempo medio de trayecto [s]: 19 *mins*.

Una vez identificados las franjas horarias de mayor congestión para este trayecto, así como su tiempo medio de trayecto a través de carretera, será preciso contemplar la oferta de vuelos establecida por al aeropuerto de Valencia en ambos intervalos con el objetivo de cunificar la demanda de pasajeros. Este proceso se llevará a cabo en la siguiente subsección junto al resto de las alternativas de trayecto posibles.

#### ■ **Medio y largo Radio.**

En último lugar, el taxi aéreo se erige como una alternativa de transporte a aquellos desplazamientos de medio y largo rango dentro del radio de autonomía de los eVTOL, aproximadamente comprendidos entre 100 y 200 *km*, respectivamente.

Este tipo de trayectos se encuentran orientados a desplazamientos turísticos y de ocio principalmente, donde el eVTOL no solo cubre una necesidad frente a la congestión, sino también hacia un nuevo medio de transporte capaz de proporcionar mayor rapidez y comodidad entre destinos situados relativamente cerca.

Para contemplar este escenario, se han propuesto dos casos de estudio según la distancia de los destinos:

- Menos de 100 *km*: Valencia - Denia.

Debido a las limitaciones de autonomía como consecuencia de la capacidad energética de los

eVTOL, se ha seleccionado Denia como uno de los potenciales destinos en el medio rango. Esta elección viene justificada por los datos de turismo proporcionados por el *Portal Estadístico de la Generalitat Valenciana* y la *Oficina de Turismo de Denia* durante el año 2019, los cuales mencionan al municipio alicantino como uno de los principales destinos turísticos de los habitantes de la capital. La tasa de viajeros correspondiente se sitúa en un 20 % del turismo nacional, tan solo detrás de los madrileños, y un 9,10 % sobre el total, teniendo en cuenta el índice correspondiente a los visitantes de carácter internacional.

A partir de estos datos, así como de la distribución media diaria proporcionada por las fuentes citadas se puede citar una demanda a lo largo del año para este trayecto atendiendo a las siguientes cifras:

<b>Demanda</b>	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Nacional</b>	27	42	67	127	61	71	230	289	66	39	44	42
<b>Valencia</b>	6	9	15	27	13	15	49	61	14	9	10	9

Tabla 5.2: Media diaria de visitantes en el municipio de Dènia según tasa de procedencia (2019). Fuentes: [Turismo], [IVE, a].

- Menos de 200 km: Valencia - Ibiza.

Con el objetivo de establecer posibles conexiones dentro de este rango, se ha llevado a cabo un análisis del tráfico de pasajeros desde y hacia el aeropuerto de Valencia. Tomando como referencia los datos correspondientes al año 2022 proporcionados por AENA, se ha realizado una consulta personalizada de los movimientos correspondientes a Valencia como aeropuerto base y sus operaciones, medidos en pasajeros anuales.

Como puede observarse en la Tabla 5.3 y en la Figura 5.7, el destino que representa un mayor movimiento es el aeropuerto de Palma de Mallorca, con un total de 641,800 pasajeros totales entre salidas y llegadas. Sin embargo, este destino no cumple con el requisito de distancia inferior a 200 km planteado en el caso de estudio y determinado por los parámetros de diseño referentes a los eVTOL.

Nacional				Todos			
<b>Aeropuerto</b>	Total	Salidas	Llegadas	<b>Aeropuerto</b>	Total	Salidas	Llegadas
Palma	641.800	318.316	323.484	Palma	641.800	318.316	323.484
Ibiza	310.526	155.276	155.250	Amsterdam	343.814	173.194	170.620
Madrid	307.925	158.195	149.730	Ibiza	310.526	155.276	155.250
Sevilla	197.713	99.528	98.185	Madrid	307.925	158.195	149.730
Bilbao	157.902	79.375	78.527	Paris	294.009	147.570	146.439
Santiago	150.803	74.422	76.381	Londres	284.678	144.139	140.539

Tabla 5.3: Mayor tráfico de pasajeros según ruta O/D para el aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENA, 2022].

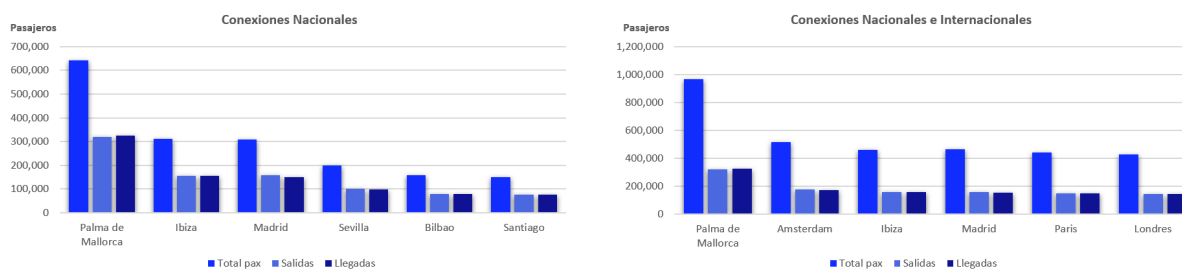


Figura 5.7: Distribución de los pasajeros según O/D desde el aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENA, 2022].

En segundo lugar, Ibiza se alza como el segundo destino nacional con mayor tráfico de pasajeros desde y hacia el aeropuerto valenciano, alcanzando una demanda total de 310.526 pasajeros entre salidas y llegadas. Además, Ibiza no solo cuenta con la segunda cuota comercial en lo referente a movimientos nacionales, sino que además representa la tercera posición en el tráfico total del aeropuerto, considerando movimientos nacionales e internacionales, solo por detrás de Palma de Mallorca y Amsterdam-Schiphol.

Asimismo, este destino se enmarca dentro del objeto de estudio planteado, ajustándose a los requisitos del trayecto propuesto, al encontrarse a una distancia aproximada de 160 *km*. Es por ello que Ibiza se erige como un potencial destino para el establecimiento de una ruta comercial de taxi aéreo dentro de una red de vertipuertos enfocada en largo rango aunque, debido a las características del itinerario, resulta necesario analizar la estacionalidad de la ruta para un correcto dimensionamiento de la infraestructura.

## 5.4. Comparación de los tiempos de trayecto.

Debido al impacto en la demanda de factores como la duración del trayecto frente a otras opciones de movilidad, esta sección aborda un análisis detallado sobre el tiempo estimado para cada uno de los trayectos correspondientes a los perfiles de misión planteados en el estudio: commuting, airport shuttle, medio alcance y largo radio. El propósito de este estudio reside en la evaluación del eVTOL como alternativa de transporte y movilidad frente al tráfico rodado y el transporte público para los diferentes servicios planteados, con el objetivo de conocer la viabilidad de su explotación comercial dentro de una red de vertipuertos, tomando la estación de Joaquín Sorolla como punto de referencia para albergar la implementación de un vertipuerto.

Para su ejecución, se han analizado las alternativas de transporte disponibles para cada uno de los casos de aplicación propuestos a lo largo de este proyecto y dividiéndose principalmente entre transporte individual, servicio taxi y transporte público. Cabe mencionar que las alternativas de transporte variarán de tal forma que, para los casos de medio y largo alcance, no existen algunas de las alternativas correspondientes al transporte público. De este modo, las alternativas analizadas se constituyen de la siguiente forma:

### 5.4.1. Análisis comparativo para el perfil de misión commuting.

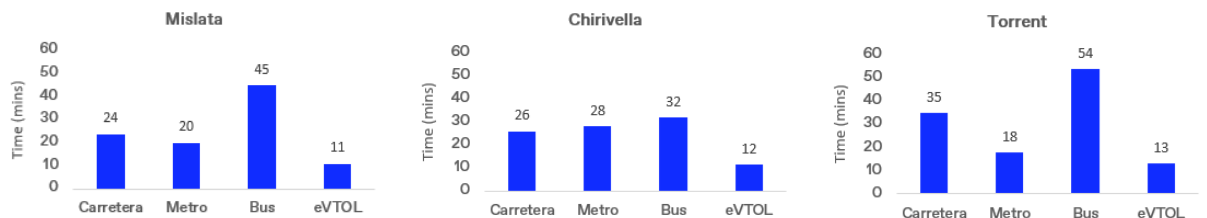
Para el perfil de misión correspondiente a una red de commuting, se ha llevado a cabo un estudio sobre los diferentes medios de transporte y alternativas para la realización de los trayectos mencionados en base a la condensación del tráfico en hora punta, siendo estos los siguientes:

- Carretera. Vehículo privado o servicio de taxi.
- Transporte público. Metro y bus.
- eVTOL.

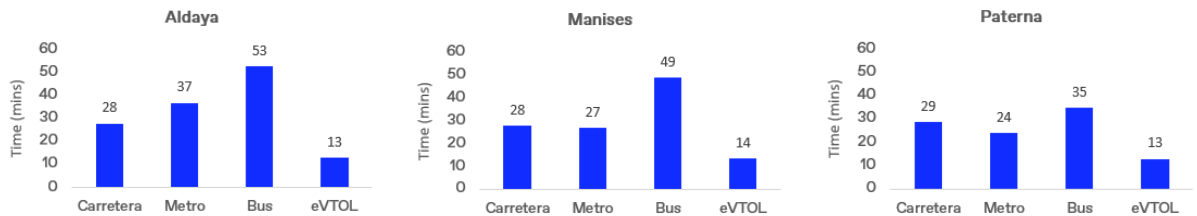
Los datos empleados para la estimación de tiempo de los diferentes trayectos definidos se ha empleado la herramienta *TomTom Traffic Stats* y *Google Maps*. En el caso de la estimación para el caso eVTOL, se ha procedido al planteamiento de las siguientes hipótesis:

- **Tiempo de embarque:** 7 *min*.
- **Tiempo de desembarque:** 2 *min*.
- **Velocidad de crucero:** 100 *km/h*.

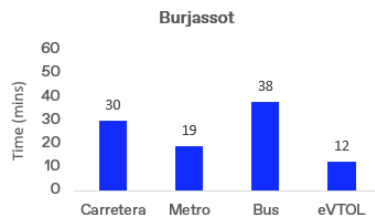
Tomando como referencia estos datos y a través de las distancias medidas punto a punto para cada uno de los municipios establecidos como destino dentro de la red de commuting, se han obtenido los siguientes resultados:



(a) Tiempos para J.Sorolla-Mislata en minutos. (b) Tiempos para J.Sorolla-Chirivella en minutos. (c) Tiempos para J.Sorolla-Torrent en minutos.

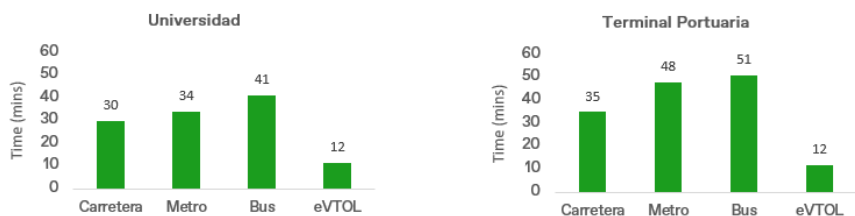


(d) Tiempos para J.Sorolla-Aldaya en minutos. (e) Tiempos para J.Sorolla-Manises en minutos. (f) Tiempos para J.Sorolla-Paterna en minutos.

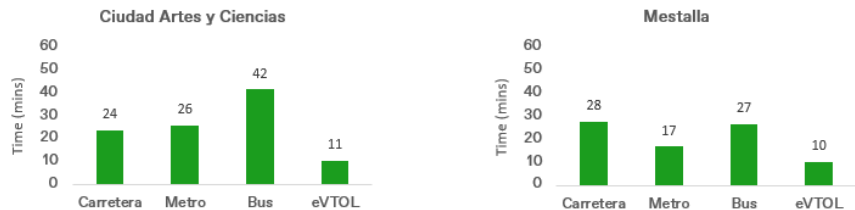


(g) Tiempos para J.Sorolla-Burjassot en minutos.

Figura 5.8: Comparación de los tiempos de trayecto en el caso de commuting. Fuente: [TomTom, 2023a].



(a) Tiempos para J.Sorolla-Universidad en minutos. (b) Tiempos para J.Sorolla-Terminal Portuaria en minutos.



(c) Tiempos para J.Sorolla-Ciudad de las Artes en minutos. (d) Tiempos para J.Sorolla-Mestalla en minutos.

Figura 5.9: Comparación de los tiempos de trayecto en el caso de lugares de interés. Fuente: [TomTom, 2023a].

Como puede observarse en la Figura 5.8, los tiempos de trayecto en el caso de un servicio eVTOL supondría una clara mejora frente al resto de alternativas de transporte. Esta mejora, aunque oscilante según el municipio de destino, supone una disminución media en el tiempo de

viaje de un 44,3% frente a la alternativa más rápida y siempre superior al 37%, valor mínimo correspondiente a la conexión con Burjassot y que se traduce en 7 *min* como duración del trayecto. Por otro lado, la posible implementación de un servicio de taxi aéreo en esta red refleja una reducción media del tiempo de viaje del 51,2% frente al desplazamiento rodado mediante vehículo privado o taxi, lo cual supone un gran argumenton para su consideración.

De igual forma, se ha aplicado el mismo procedimiento a los diferentes lugares de interés con posible potencial de integrar una red urbana debido a su alta concentración de visitantes a través de la ciudad de Valencia, analizando las mismas alternativas de transporte. A diferencia del caso de commuting, la implementación del servicio de taxi aéreo en los desplazamientos de carácter intraurbana permitiría optimizar el tiempo de trayecto para los puntos establecidos en un 55,25% de media, con una reducción mínima del 41% y hasta un 66% en el trayecto más favorable.

#### 5.4.2. Análisis comparativo para el perfil de misión Airport shuttle.

Continuando con la metodología aplicada en la subsección anterior con el servicio aplicado a commuting y desplazamientos intraurbanos, se ha procedido a analizar el análisis comparativo para el servicio de airport shuttle, encargado de conectar la estación de tren Joaquín Sorolla con el aeropuerto de Valencia. Para ello, se han contemplado las mismas alternativas de transporte, así como las mismas hipótesis planteadas previamente para la misión eVTOL.

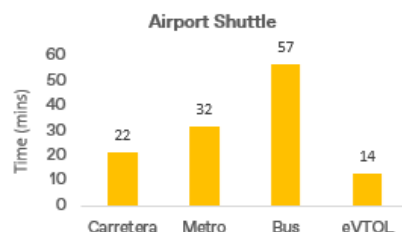


Figura 5.10: Tiempos para J.Sorolla-Aeropuerto en minutos. Fuente: [TomTom, 2023a].

De acuerdo con la Figura 5.10, la implementación de un servicio eVTOL también supone una mejora en el tiempo de trayecto para este caso de aplicación. Concretamente, supone una mejora del 36,4% frente a las otras alternativas de transporte, lo cual se traduce en una reducción de 8 *min* en el tiempo de viaje frente a la alternativa más rápida, el transporte por carretera.

#### 5.4.3. Análisis comparativo para los perfiles de misión medio y largo alcance.

A continuación, se aborda el último de los supuestos para las misiones comprendidas en el medio y largo alcance. En este caso, las alternativas de transporte son dependientes de las conexiones existentes entre el emplazamiento definido como base y los puntos propuestos como destino.

Por otro lado, la misión eVTOL presenta ciertas particularidades como consecuencia de las mayores distancias a recorrer. Pese a que los tiempos de embarque y desembarque definidos no varían respecto a los casos de aplicación anteriormente descritos, sí lo hace la velocidad de crucero. Esto se debe a la explotación de una ruta fuera del ámbito urbano y la distancia comprendida entre origen y destino, notablemente mayor para ambos supuestos, permitiendo incrementar la velocidad de vuelo.

Para su determinación, se ha tomado como referencia un valor medio basado en las especificaciones técnicas de las diferentes propuestas eVTOL expuestas en la sección 4, y que se corresponde con una velocidad de crucero de 237,4 *km/h*. De esta manera, se representan los resultados obtenidos para cada uno de los supuestos de la siguiente manera:



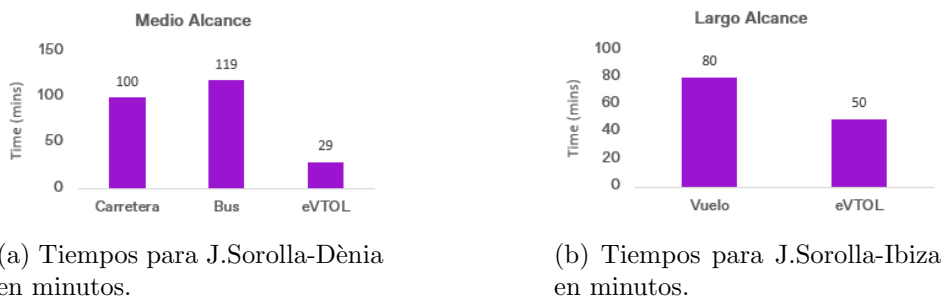


Figura 5.11: Comparación de los tiempos de trayecto en el caso de medio y largo alcance. Fuente: [TomTom, 2023a].

Para el caso del medio alcance, reflejado en la Figura 5.11a, la introducción del eVTOL representa una gran mejora frente a las dos alternativas de transporte: vehículo privado o taxi y autobús. Esta mejora viene materializada por una reducción del 71 % del tiempo medio estimado para este trayecto y, como consecuencia, representa una gran oportunidad para la explotación de esta ruta, categorizada por una clara demanda previamente definida.

Por otro lado, el caso de aplicación enfocado al largo alcance se basa en el análisis comparativo con un solo medio de transporte alternativo: el avión. La ruta Valencia-Ibiza se trata de una ruta establecida y operada desde y hacia el aeropuerto de Valencia como conexión regular, representando una gran demanda de pasajeros de acuerdo con lo descrito en el Punto 5.3.2.

De manera análoga a la hipótesis planteada para los tiempos correspondientes a la misión eVTOL, se han establecido los mismos tiempos complementarios a la duración del trayecto para el caso del vuelo regular, atendiendo a los siguientes criterios establecidos de acuerdo con los tiempos mínimos proporcionados por la línea operadora:

- **Tiempo de embarque:** 20 *min.*
- **Tiempo de desembarque:** 10 *min.*
- **Duración del vuelo:** 50 *min.*

De esta forma, el tiempo total estimado para el vuelo tipo que define la ruta de largo alcance presenta un tiempo total de 80 *min.*, como puede observarse en la Figura 5.11b. Frente a esta alternativa, el eVTOL presenta una optimización del tiempo de viaje del 37,5 %. Esta reducción del tiempo de trayecto viene dada como consecuencia de la optimización de los tiempos de embarque y desembarque definidos, pues no representa una solución competitiva en cuanto a reducción del tiempo de vuelo.

No obstante, la implantación de un servicio eVTOL que opere esta ruta permitiría captar un sector de la demanda que apuesta por la flexibilidad del horario y el confort de la reducción de tiempos de espera ligados a la aviación convencional, a los cuales no se ha añadido el desplazamiento hasta el aeropuerto de origen y desde el aeropuerto destino hacia el centro de la ciudad.

## 5.5. Estimación de la demanda como parámetro de diseño.

En esta sección se llevará a cabo la estimación de la demanda de pasajeros por hora pico (PHP) del vertipuerto como un parámetro clave para su dimensionamiento técnico. El objetivo es establecer una estimación de la demanda horaria máxima que permita dimensionar la infraestructura y los servicios requeridos para satisfacer dicha demanda.

Para realizar esta estimación, se tomará como referencia el caso de uso que presente un mayor tráfico de pasajeros de acuerdo a los casos planteados y, además, debido a la similitud en cuanto a la operación y servicio prestado por el vertipuerto con el mundo aeroportuario, se realizará un

análisis de las horas pico del aeropuerto de Valencia para obtener un marco de referencia que adaptar al potencial tráfico de la infraestructura.

En primer lugar, se asume como hipótesis que el período transcurrido durante el fin de semana capturaría la mayor demanda de pasajeros en base a las rutas planteadas, principalmente motivado por las conexiones de carácter turístico y estacional. Por otro lado, se ha procedido a seleccionar la ruta que mayor demanda de tráfico de pasajeros comercial presenta entre las dos conexiones que caracterizan este perfil de misión, seleccionando la ruta Valencia-Ibiza con un total de 310.526 pasajeros totales durante el año 2022, lo cual supone un 3,83 % del tráfico total correspondiente al aeropuerto de Valencia.

Una vez identificado el caso que representa la mayor demanda de pasajeros, se procede al estudio de la distribución de las operaciones del aeropuerto de Valencia. Para ello, se han contabilizado los movimientos de aeronaves diarios, tanto de llegadas como salida, a lo largo de los diferentes fines de semana correspondientes a los meses de Junio, Julio y Agosto del año 2022, los cuales caracterizan el período de tiempo con mayor concentración de operaciones en el aeropuerto. De esta forma, se ha realizado una estimación media de los valores recogidos para alcanzar el número de operaciones diarias atendiendo a la siguiente distribución:

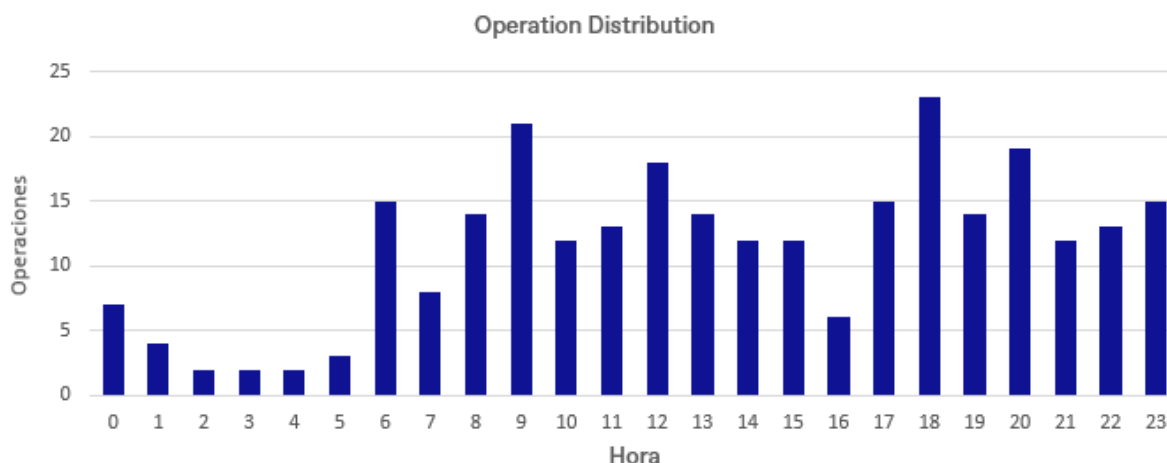


Figura 5.12: Distribución horaria de las operaciones para el aeropuerto de Valencia. Fuentes: [AENA, 2010], [Flightradar24, 2023].

De acuerdo con lo observado en la Tabla 5.12, la hora que representa mayor número de movimientos son las 6 de la tarde con un total de 23 operaciones. Debido a las características del vertipuerto planteado, esta distribución de la demanda será tomada como referencia para la determinación de los pasajeros hora pico que la infraestructura planteada puede albergar.

En lo referente a este aspecto, el *Plan Director del Aeropuerto de Valencia* establece en su análisis de capacidad y demanda un total de 3.490 pasajeros hora pico y 2.430 pasajeros hora diseño (PHD) para el horizonte 2, escenario medio tomado como modelo, en las previsiones de tráfico del aeropuerto [AENA, 2010].

	AHP	PHP	AHD	AHD <sub>sal</sub>	AHD <sub>lleg</sub>	PHD	PHD <sub>sal</sub>	PHD <sub>lleg</sub>
Horizonte 1	33	3.100	27	20	19	2.160	1.560	1.510
Horizonte 2	35	3.490	28	21	20	2.430	1.750	1.700
Horizonte 3	37	3.760	31	23	22	2.620	1.890	1.830

Tabla 5.4: Parámetros de diseño del aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENA, 2010].

Teniendo en cuenta que el cálculo de estos parámetros de diseño se realizan de acuerdo a la demanda total estimada a lo largo del tiempo para el aeropuerto, es necesario adaptar su valor



a la demanda prevista para el vertipuerto. En el caso del vertipuerto, al tratarse de un medio de transporte no existente, se carece de los datos estimativos de referencia para poder realizar una prognosis del tráfico en base a un histórico y, como consecuencia, la máxima capacidad del vertipuerto se ha planteado en base a dos supuestos: demanda por hora pico relativa y tasa de adopción del eVTOL. Para ello, primeramente se ha procedido al cálculo de los parámetros de diseño relativos a la demanda descrita por la ruta de estudio, 310.526 pasajeros, lo cual representa un  $PHP_{rel}$  de 134 pasajeros y un  $PHD_{rel}$  correspondiente a 93. A su vez, en lo referente a la aceptación del medio eVTOL como alternativa de transporte en base a su seguridad por parte de los pasajeros, este estudio tomará el estudio realizado por la NASA como marco de referencia, donde se menciona que al menos un 25% de la muestra encuestada concibe una tasa de alta confianza sobre este medio de transporte y su interés por adoptarla, de los cuales tan solo un 5,2% representan una tasa de aceptación total del servicio en los primeros años de explotación de la tecnología. Por lo tanto, partiendo de una metodología fundamentada en las hipótesis formuladas, es posible alcanzar unos parámetros de diseño para el vertipuerto objetivo correspondientes a  $PHP_{vert}$  de 7 pasajeros y de 5 pasajeros para el caso del de  $PHD_{vert}$ . De este modo, es posible trazar de manera representativa la distribución de la demanda para el caso del vertipuerto:

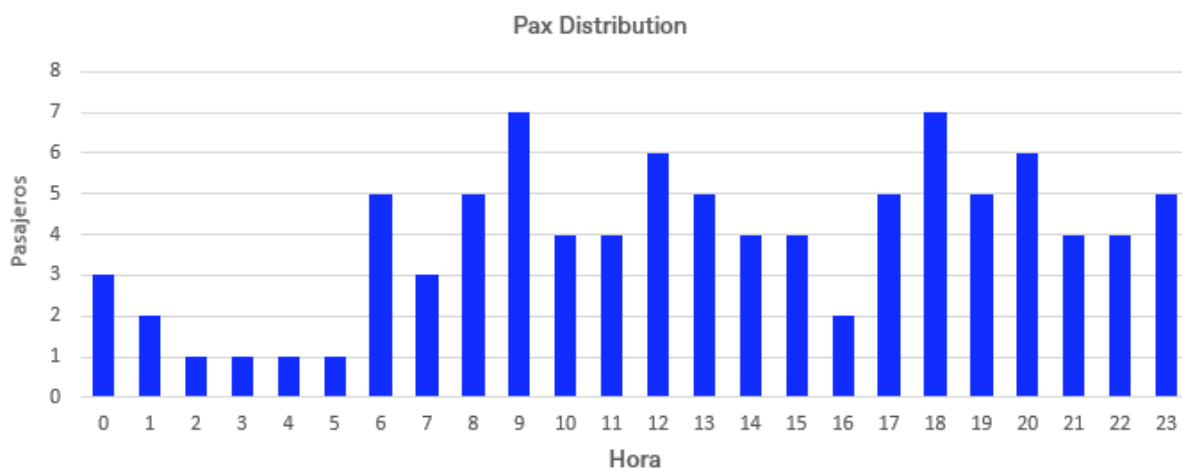


Figura 5.13: Distribución horaria de la demanda para el vertipuerto según la distribución del aeropuerto de Valencia.

En resumen, la estimación de la demanda de pasajeros por hora pico del vertipuerto resulta un parámetro fundamental para su dimensionamiento técnico. Tomando como partida el caso de uso que representa una mayor demanda, así como la distribución de movimiento en las horas pico del aeropuerto de Valencia, se puede establecer una estimación inicial de la demanda horaria máxima. Sin embargo, es importante destacar que esta estimación debe ser refinada y ajustada mediante estudios más detallados para obtener una visión precisa de la demanda esperada, permitiendo dimensionar adecuadamente la infraestructura y los servicios del vertipuerto para garantizar una operación eficiente y satisfacer las necesidades de movilidad de los pasajeros en Valencia.



# Capítulo 6

## Selección y estudio del emplazamiento

En este capítulo, se abordará la etapa correspondiente a la selección y estudio del emplazamiento para la implementación de un vertipuerto urbano en la ciudad de Valencia. La elección adecuada de la ubicación para el vertipuerto es fundamental para garantizar su eficiencia operativa, conectividad con el entorno urbano y satisfacción de la demanda de pasajeros. Para ello, esta localización parte de las conclusiones obtenidas en la sección anterior, cuyos resultados reflejaban la necesidad de su emplazamiento en las áreas próximas a la estación de Joaquín Sorolla.

Con esta información como precedente, es necesario abordar las diferentes posibilidades en el planeamiento urbano con una superficie suficiente para albergar una infraestructura de tales características.

### 6.1. Emplazamiento del vertipuerto.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la zona o región seleccionada para la localización de la infraestructura se encuentra acotada al área circundante a la estación Joaquín Sorolla. Debido a que algunos de los criterios de selección de esta localización reside en la compatibilidad del tráfico de pasajeros, su ubicación céntrica y el potencial intermodal que dotaría al vertipuerto por su cercanía a la estación, se estructura una búsqueda en un radio no mayor a 1 *km* de distancia respecto a la propia estación.



Figura 6.1: Parcelas disponibles dentro de un rango de 1 km de distancia desde Joaquín Sorolla. Fuente: [IGV].

Haciendo uso de la información proporcionada por la *Sede Electrónica del Catastro de la GVA*, se ha trazado un área de búsqueda tomando la estación Joaquín Sorolla como centro del área dibujada dentro de la cual se han identificado aquellas parcelas no urbanizadas susceptibles a albergar el vertipuerto.

Como puede observarse en la Figura 6.1, se han identificado 9 parcelas disponibles, todas ellas calificadas como suelo urbano sin edificar. Una vez identificadas, se ha centrado el foco de búsqueda a aquellas parcelas superiores a una superficie total de  $1,000\text{ m}^2$ , extensión mínima estimada para albergar una infraestructura de tal envergadura, reduciendo las opciones a las listadas a continuación:

Parcela	Referencia	Clase	Superficie
A	5415722YJ2751E0001DO	Urbano	$8.225\text{ m}^2$
C	4906601YJ2740F0001ZB	Urbano	$11.883\text{ m}^2$
F	5203801YJ2750C0001FB	Urbano	$37.602\text{ m}^2$
H	5203803YJ2750C0001OB	Urbano	$18.043\text{ m}^2$
I	5203804YJ2750A0001KW	Urbano	$18.952\text{ m}^2$

Tabla 6.1: Parcelas disponibles con superficie superior a  $1.000\text{ m}^2$ . Fuente: [IGV].

De todas las parcelas descritas en la Tabla 6.1, se descarta la parcela *I* debido a que parcialmente se encuentra fuera del rango delimitado como potencial. Respecto a las opciones restantes, se ha tomado la cantidad de superficie disponible como parámetro de criterio para la selección final del emplazamiento debido a la libertad en cuanto al dimensionamiento de la infraestructura, siendo la Parcela F la seleccionada para albergar la infraestructura del correspondiente vertipuerto. Además, esta parcela presenta grandes ventajas respecto a las Parcelas A y C en cuanto a sus perímetros colindantes con edificaciones de alta envergadura.

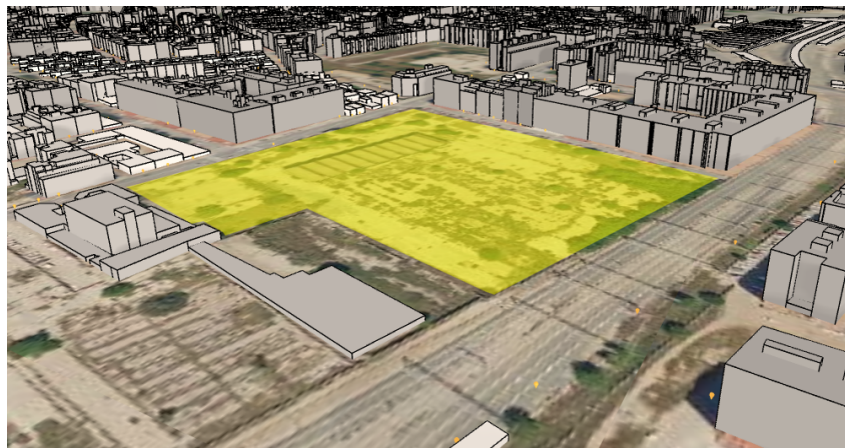


Figura 6.2: Proximidad de los edificios respecto a la Parcela F. Fuente: [Earth].

En este caso, las edificaciones presentes en la pared norte y parcialmente en la este representan un obstáculo para la operación del vertipuerto mientras las operaciones en configuración sur y oeste parecen previsiblemente viables, si bien es necesario corroborarlo mediante el dimensionamiento de la zona libre de obstáculos. Por otro lado, aunque la Parcela H representa una potencial localización para implantar el vertipuerto, describe una mayor distancia a la estación así como un 53% de superficie disponible menos condicionan su elección.

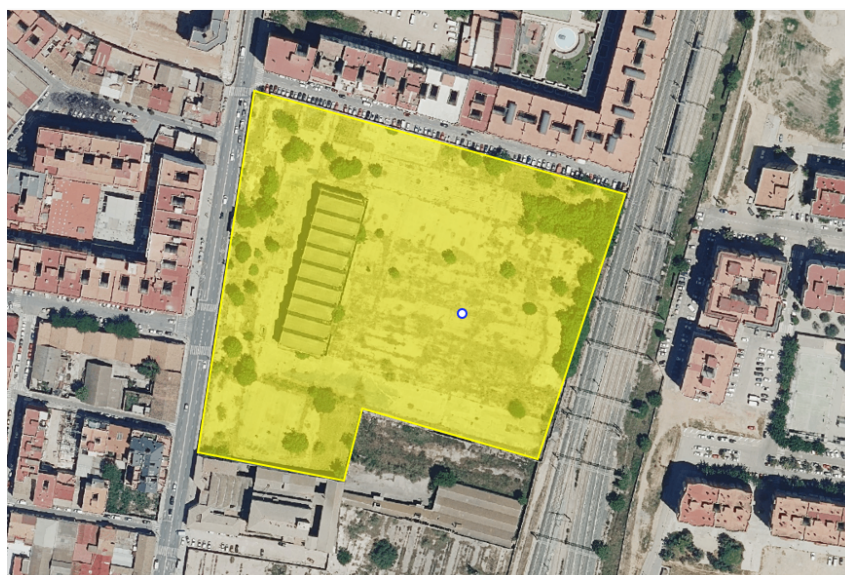


Figura 6.3: Emplazamiento final del vertipuerto y punto de referencia. [Earth].

Finalmente, de acuerdo con la decisión final sobre el emplazamiento, se ofrece la distribución en planta de la misma, en la cual se ha establecido un punto de referencia para continuar el estudio sobre el emplazamiento y comenzar el dimensionamiento de la infraestructura con las siguientes coordenadas:

Sist. Ref	Latitud	Longitud	Altitud
WGS84	39,452635° N	0,382971° W	12 m

Tabla 6.2: Coordenadas del punto de referencia del vertipuerto. Fuente: Propia.

## 6.2. Estudio meteorológico.

### 6.2.1. Temperatura de referencia.

La temperatura representa una relevancia primordial entre los parámetros meteorológicos a considerar en el diseño de cualquier infraestructura aeronáutica. La razón principal radica en la correlación inversa existente entre la temperatura ambiente y la densidad del aire, originada por la disminución de la concentración de oxígeno con temperaturas elevadas. La altitud exhibe una dinámica similar, aunque en el caso bajo estudio, dada su altura relativamente insignificante, su influencia sobre las potenciales fluctuaciones en el desempeño de las aeronaves en operación no es considerablemente destacable.

De esta forma, la temperatura de referencia viene definida por la OACI como *"la media mensual de las temperaturas máximas diarias correspondiente al mes más caluroso del año (siendo el mes más caluroso aquel que tiene la temperatura media mensual más alta). Esta temperatura debería ser el promedio de observaciones efectuadas durante varios años"*, [OACI, 2013]. Por ello, se han tomado los datos meteorológicos correspondientes al histórico de la estación meteorológica más cercana al punto de referencia establecido para el emplazamiento del vertipuerto, definida por los siguientes parámetros:

Identificador	Latitud	Longitud	Altitud
8416Y	39,480805 °	-0,366243 °	11 m

Tabla 6.3: Definición de la estación meteorológicas más cercana al vertipuerto. Fuente: [AEMET].

Esta estación meteorológica se denomina como *Valencia, Viveros* y se ubica a una distancia de 3,80 km de distancia del punto de referencia determinado para caracterizar el vertipuerto. A través de los datos proporcionados por la *AEMET*, se han analizado las temperaturas medias y máximas correspondientes a cada uno de los días del año desde enero de 2013 hasta diciembre del 2022, obteniendo una muestra de análisis de considerable tamaño para obtener la temperatura de referencia.

En primer lugar, se ha realizado la media mensual de la temperatura media correspondiente a cada uno de los meses del año con el fin de determinar los meses más calurosos del año, como podemos observar en la Tabla 6.4.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>2013</b>	13,85	12,79	15,59	15,85	18,31	21,84	<b>25,98</b>	25,67	24,13	22,42	15,91	12,38
<b>2014</b>	13,97	14,25	14,75	18,83	19,51	23,37	25,28	<b>26,55</b>	25,17	22,49	16,89	12,62
<b>2015</b>	12,52	12,30	15,21	16,69	20,98	23,81	<b>27,72</b>	27,04	23,12	19,91	16,58	14,07
<b>2016</b>	14,53	14,63	14,97	17,11	19,23	22,89	<b>25,82</b>	25,81	24,24	21,11	15,47	13,20
<b>2017</b>	10,96	14,04	14,97	15,73	20,13	24,66	25,87	<b>25,88</b>	23,63	21,10	15,34	12,74
<b>2018</b>	13,69	10,89	15,33	17,29	19,52	23,45	<b>26,77</b>	27,36	24,63	19,46	15,47	13,98
<b>2019</b>	12,02	12,98	15,02	16,11	18,85	22,74	<b>26,88</b>	<b>26,88</b>	24,24	21,11	16,66	14,70
<b>2020</b>	11,84	15,49	14,81	16,37	21,22	23,17	26,24	<b>27,03</b>	23,68	19,43	15,93	12,98
<b>2021</b>	11,58	14,56	13,36	15,05	20,07	23,39	25,88	<b>26,36</b>	24,33	20,22	14,90	14,44
<b>2022</b>	11,24	13,29	13,24	15,55	20,35	25,32	27,42	<b>28,15</b>	25,29	21,65	17,93	15,25

Tabla 6.4: Registro de las temperaturas medias mensuales medidas en °C durante los años 2013 a 2022. Fuente: [AEMET].

La información recogida para este período de tiempo permite determinar Julio y Agosto como los meses más calurosos del año para todo el muestreo, lo cual nos permitirá definir las temperaturas máximas correspondientes a estos meses en el siguiente análisis. Este viene dado por la obtención media de las temperaturas máximas en cada uno de los meses, de tal forma a lo descrito en la Tabla 6.5.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>2013</b>	18,93	17,09	19,78	19,94	22,97	25,67	<b>29,91</b>	29,05	28,04	26,62	20,59	16,86
<b>2014</b>	18,12	18,51	19,52	23,52	23,37	27,18	29,26	<b>29,98</b>	29,03	27,56	20,99	17,53
<b>2015</b>	18,12	16,62	19,65	20,96	25,91	28,23	<b>31,23</b>	30,49	27,13	23,87	21,74	18,82
<b>2016</b>	18,53	18,98	19,73	21,47	25,64	26,73	<b>31,17</b>	29,30	28,29	24,64	19,74	17,21
<b>2017</b>	15,77	18,54	20,40	21,47	24,81	29,06	29,59	<b>29,29</b>	28,19	25,63	20,72	17,79
<b>2018</b>	18,33	15,18	19,92	21,72	24,04	27,55	<b>30,54</b>	31,04	28,28	23,55	19,35	19,19
<b>2019</b>	17,60	18,71	20,31	20,45	23,04	26,99	<b>30,90</b>	30,87	28,04	25,78	20,89	18,66
<b>2020</b>	16,55	20,85	18,50	20,42	25,59	27,14	29,75	<b>30,80</b>	28,29	24,68	20,45	18,00
<b>2021</b>	16,51	18,41	17,67	18,59	25,43	27,20	29,83	<b>30,05</b>	28,47	24,68	19,40	19,11
<b>2022</b>	16,69	18,23	16,32	18,70	24,75	29,43	31,27	<b>30,09</b>	29,41	25,79	22,64	19,52

Tabla 6.5: Registro de las temperaturas máximas mensuales medidas en °C durante los años 2013-2022. Fuente: [AEMET].

Ahora sí, una vez definidas todas las temperaturas representativas de acuerdo a lo descrito por la *OACI*, se estima el parámetro de diseño del vertipuerto, el cual se caracterizará con una temperatura de referencia de 30,4°C.

$$T_{ref} = 30,4^{\circ}C \quad (6.1)$$



## 6.2.2. Estudio de los vientos.

El análisis climatológico de las condiciones de viento es esencial para prever las rutas de aproximación y despegue de las aeronaves que utilizarán el vertipuerto. El objetivo de esta subsección consiste en la correcta alineación de la dirección del viento con la configuración de operación del vertipuerto, tratando de reducir lo máximo posible la presencia de vientos cruzados que podrían incrementar la peligrosidad de las operaciones y disminuir considerablemente el coeficiente de utilización de la infraestructura.

Para ello, se ha tomado de referencia el *Anexo 14 de la OACI, Anexo II*, referente al manual de helipuertos, donde se especifica que “*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. Estos criterios deben aplicarse igualmente a los helipuertos de superficie y a los helipuertos elevados*”, [OACI, 2013].

En primer lugar, se ha llevado a cabo el estudio de los datos correspondientes al histórico de los vientos que caracterizan la estación climatológica más próxima al emplazamiento del vertipuerto, tomando como muestra de estudio las intensidades, medidas en nudos, y la orientación de los mismos durante el período de tiempo de 2013 a 2022. En la Tabla 6.6, puede observarse la distribución de los vientos según su intensidad y orientación, donde ya puede intuirse la posible distribución que adquiriría el vertipuerto para su operación.

Or/V	Calma	01-03 kts	04-06 kts	07-10 kts	11-16 kts	17-21 kts	+22 kts	Total
Calma	375	0	0	0	0	0	0	375
N	0	509	181	318	133	24	0	1165
NNE	0	125	34	105	30	2	0	296
NE	0	71	15	61	5	0	0	152
ENE	0	32	7	32	0	1	0	72
E	0	671	137	568	22	0	0	1398
ESE	0	544	123	464	17	1	0	1149
SE	0	182	50	147	7	0	0	386
SSE	0	69	20	50	4	0	0	143
S	0	38	12	27	4	0	0	81
SSW	0	36	18	20	10	3	0	87
SW	0	108	74	56	65	6	2	311
WSW	0	182	165	67	143	28	0	585
W	0	189	195	69	145	27	3	628
WNW	0	26	14	12	15	6	0	73
NW	0	65	17	38	29	3	0	152
NNW	0	64	21	33	32	4	0	154
<b>Total</b>	375	2911	1083	2067	661	105	5	7207

Tabla 6.6: Registro de los vientos según intensidad y orientación para el período 2013-2022. Fuente: [AEMET].

Al tratarse de una estación climatológica inmersa en plena ciudad, no se aprecian grandes valores en lo referente a las intensidad del viento, siendo este principalmente por debajo de 10 *kts* y la gran mayoría inferiores a 6 *kts*. Tomando como base esta referencia, es posible anticipar que el análisis de la velocidad e intensidad del viento no representará grandes problemas para la implementación del vertipuerto en este emplazamiento.

De igual forma, se ha procedido al estudio de la frecuencia de distribución de los datos analizados. Este estudio tiene como objetivo establecer la orientación de las operaciones en base a los vientos predominantes característicos en las inmediaciones de la ubicación seleccionada, y cuyos datos se recogen en las Tablas 6.7, 6.8 y 6.9.

Or/V	Calma	01-03 kts	04-06 kts	07-10 kts	11-16 kts	17-21 kts	+22 kts
<b>Calma</b>	5,20 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
<b>N</b>	0,00 %	4,40 %	1,36 %	2,62 %	1,19 %	0,21 %	0,00 %
<b>NNE</b>	0,00 %	1,73 %	0,47 %	1,46 %	0,42 %	0,03 %	0,00 %
<b>NE</b>	0,00 %	0,99 %	0,21 %	0,85 %	0,07 %	0,00 %	0,00 %
<b>ENE</b>	0,00 %	0,44 %	0,10 %	0,44 %	0,00 %	0,01 %	0,00 %
<b>E</b>	0,00 %	9,31 %	1,90 %	7,88 %	0,31 %	0,00 %	0,00 %
<b>ESE</b>	0,00 %	7,55 %	1,71 %	6,44 %	0,24 %	0,01 %	0,00 %
<b>SE</b>	0,00 %	2,53 %	0,69 %	2,04 %	0,10 %	0,00 %	0,00 %
<b>SSE</b>	0,00 %	0,96 %	0,28 %	0,69 %	0,06 %	0,00 %	0,00 %
<b>S</b>	0,00 %	0,53 %	0,17 %	0,37 %	0,06 %	0,00 %	0,00 %
<b>SSW</b>	0,00 %	0,50 %	0,25 %	0,28 %	0,14 %	0,04 %	0,00 %
<b>SW</b>	0,00 %	1,50 %	1,03 %	0,78 %	0,90 %	0,08 %	0,03 %
<b>WSW</b>	0,00 %	2,53 %	2,29 %	0,93 %	1,98 %	0,39 %	0,00 %
<b>W</b>	0,00 %	5,29 %	3,86 %	2,75 %	2,66 %	0,50 %	0,04 %
<b>WNW</b>	0,00 %	0,36 %	0,19 %	0,17 %	0,21 %	0,08 %	0,00 %
<b>NW</b>	0,00 %	0,90 %	0,24 %	0,53 %	0,40 %	0,04 %	0,00 %
<b>NNW</b>	0,00 %	0,89 %	0,29 %	0,46 %	0,44 %	0,06 %	0,00 %

Tabla 6.7: Frecuencia normalizada de los vientos según intensidad y orientación para el período 2013-2022. Fuente: Propia.

Calma	1 a 3 kts	4 a 6 kts	7 a 10 kts	11 a 16 kts	17 a 21 kts	22 a 27 kts
5,20 %	40,39 %	15,03 %	28,68 %	9,17 %	1,46 %	0,07 %

Tabla 6.8: Frecuencia normalizada de los vientos según intensidad para el período 2013-2022. Fuente: Propia.

Calma	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
5,20 %	9,78 %	4,11 %	2,11 %	1,00 %	19,40 %	15,94 %	5,36 %	1,98 %
S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
1,12 %	1,21 %	4,32 %	8,12 %	15,10 %	1,01 %	2,11 %	2,14 %	100 %

Tabla 6.9: Frecuencia de los vientos según su orientación para el período 2013-2022. Fuente: Propia.

En base a los datos de viento recopilados durante el período 2013-2022, se observa lo siguiente:

- La dirección predominante del viento proviene del este (E), con una frecuencia del 19,40 %.
- La segunda dirección predominante a considerar proviene del oeste (W), con una frecuencia del 15,10 %.
- La mayoría de los vientos tienen una intensidad inferior a 10 *kts*, lo que indica condiciones generalmente favorables para las operaciones de eVTOL.
- La frecuencia de los vientos en dirección norte (N) es notable, pero su intensidad es generalmente baja.

La Figura 6.4 muestra la rosa de los vientos correspondiente a la localización de referencia,



proporcionando una visualización clara de las direcciones y frecuencias de los vientos predominantes.

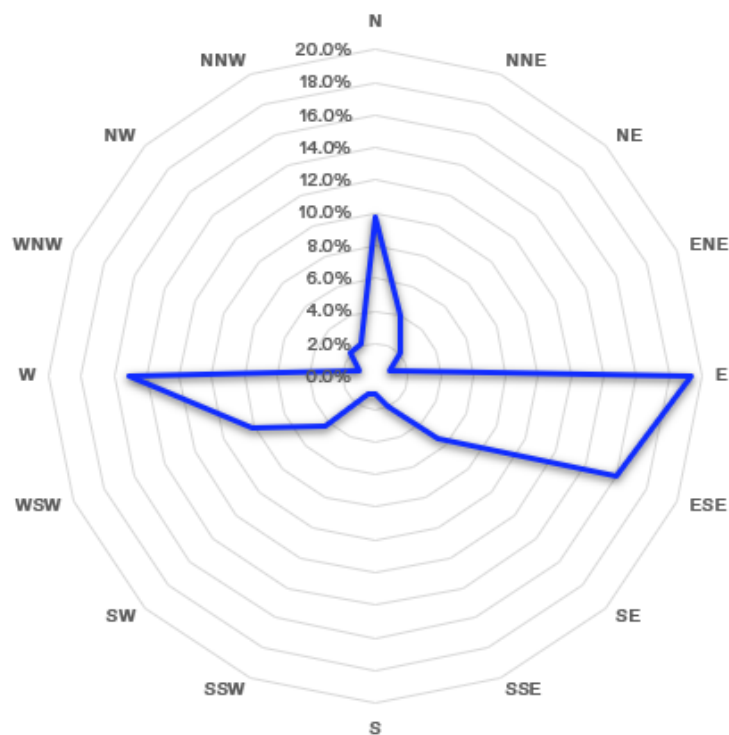


Figura 6.4: Rosa de los vientos correspondientes a la localización de referencia. Fuente: Propia.

### Configuración Óptima de Operación

En base a los resultados obtenidos en la tabla de frecuencias, se determina  $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$  como la configuración óptima de operación para las trayectorias del vertipuerto. Esta configuración garantiza que las operaciones se realicen mayoritariamente con el viento de cara, lo cual es crucial para la seguridad y eficiencia de las operaciones de despegue y aterrizaje.

De acuerdo con lo citado previamente en las directivas de la OACI, se deben incluir dos superficies de aproximación que mantengan una separación angular de  $150^{\circ}$  con el fin de garantizar el mayor número de operaciones orientadas con el viento de cara, siendo la configuración seleccionada la que garantiza el cumplimiento de este requisito priorizando la dirección *Este* como trayectoria dominante [OACI, 2013].

### Efectos de los Vientos Transversales

Los vientos transversales encontrados en dirección norte (N) podrían provocar rachas ocasionales. Sin embargo, generalmente representan componentes de viento de baja intensidad y menor magnitud en comparación con la orientación planteada Este (E) - Oeste (W). Estos vientos transversales no deberían representar un problema significativo para las operaciones del vertipuerto, aunque podrían valorarse la implementación de medidas preventivas como:

- Barreras naturales o artificiales: Implementar barreras para mitigar el impacto de los vientos transversales desde el norte, protegiendo las zonas de despegue y aterrizaje.
- Procedimientos operativos específicos: Desarrollar procedimientos específicos para las operaciones con viento de costado, asegurando que los pilotos estén preparados para manejar estas condiciones.
- Monitorización continua del viento: Instalar estaciones meteorológicas en el vertipuerto

para monitorizar continuamente las condiciones del viento y ajustar las operaciones según sea necesario.

En conclusión, la configuración óptima para las trayectorias del vertipuerto es 90°-270°, priorizando la dirección Este (E) como la trayectoria dominante.

### Coefficiente de utilización

Para calcular el coeficiente de utilización, se ha considerado una componente máxima permitida de viento transversal de 16 kts. Tomando este dato como base, se ha realizado el cálculo de la componente de viento cruzado para cada combinación de dirección y velocidad del viento, siguiendo el siguiente proceso:

$$\text{Componente de Viento Cruzado} = V \times \sin(\theta) \quad (6.2)$$

Donde:

- $V$  es la velocidad del viento.
- $\theta$  es el ángulo entre la dirección del viento y la orientación de la pista (90 grados).

$$\text{Coef. Utilización} = \left( \frac{\text{Freq. Vientos Aceptables} + \text{Freq. Calma}}{\text{Total Observaciones}} \right) \times 100 \% \quad (6.3)$$

$$\text{Freq. Vientos Aceptables} = 2911 + 1083 + 2067 + 661 + 105 = 6827 \quad (6.4)$$

$$\text{Freq. Calma} = 375 \quad (6.5)$$

$$\text{Total Observaciones} = 7207 \quad (6.6)$$

$$\text{Freq. Vientos Aceptables} = 2911 + 1083 + 2067 + 661 + 105 = 6827 \quad (6.7)$$

$$\text{Coef. Utilización} = \left( \frac{6827 + 375}{7207} \right) \times 100 \% \approx 99,54 \% \quad (6.8)$$

Como puede observarse en la Ecuación 6.8, la configuración seleccionada cumple los requerimientos de coeficiente de utilización del 95% y asegura que la mayoría de las operaciones se realicen con el viento de cara, tal como se indica en el *Anexo 14* [OACI, 2013].

### 6.2.3. Declinación magnética.

En último lugar, resulta necesario comprobar la implicación de la declinación magnética en el estudio de la configuración de trayectoria realizada en base al estudio de vientos. Aunque es imprescindible garantizar que la declinación magnética no sea lo suficientemente pronunciada como para que pueda causar alteraciones en estas direcciones geográficas, en caso de que suceda, deberá tomarse en cuenta para que la solución sea lo más ajustada a la realidad.

Para un emplazamiento concreto, la declinación magnética se define como el ángulo que se forma entre el norte magnético del lugar y el norte verdadero, también conocido como norte geográfico. En términos sencillos, representa la discrepancia entre el norte geográfico y el que indica una brújula, representando el norte magnético. Siguiendo el criterio establecido, si el

norte magnético se encuentra al este del norte verdadero, la declinación se considera positiva, y se asigna un valor negativo en el caso de que este se encuentre al oeste. El concepto de variación magnética es sinónimo de declinación magnética.

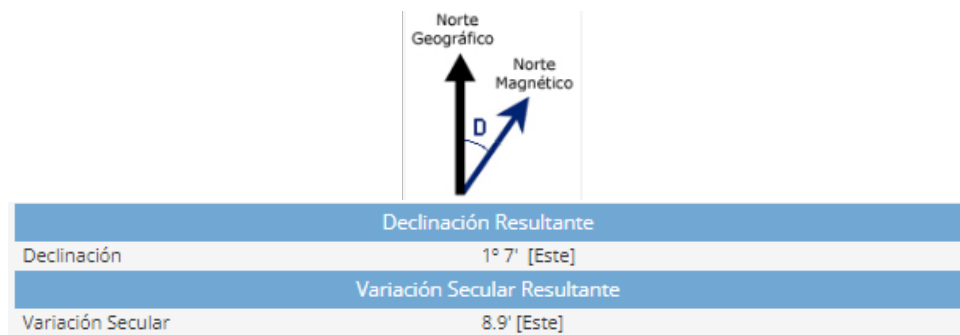


Figura 6.5: Declinación magnética para el emplazamiento seleccionado. Fuente: [IGN].

$$\text{Declinación magnética} \equiv [\delta] = 1^{\circ}7' = 1,12^{\circ} \quad (6.9)$$

En este caso, se estima el valor de la declinación magnética en base a la información proporcionada por el *Instituto Geográfico Nacional* para el punto de referencia del vertipuerto, con un valor positivo de  $+1,12^{\circ}$ . De esta manera, este factor no representa un gran impacto para las direcciones de operación planteadas en base a la orientación de los vientos predominantes, si bien es cierto que pueden ser modificadas en función de los posibles obstáculos del entorno a la hora de la implantación de los procedimientos y el diseño de las superficies libres de obstáculos.

#### 6.2.4. Estudio de precipitaciones y otros fenómenos climatológicos.

Es imprescindible realizar un análisis exhaustivo de la pluviometría para adecuar el diseño y prevenir inundaciones que puedan afectar la operación del vertipuerto.

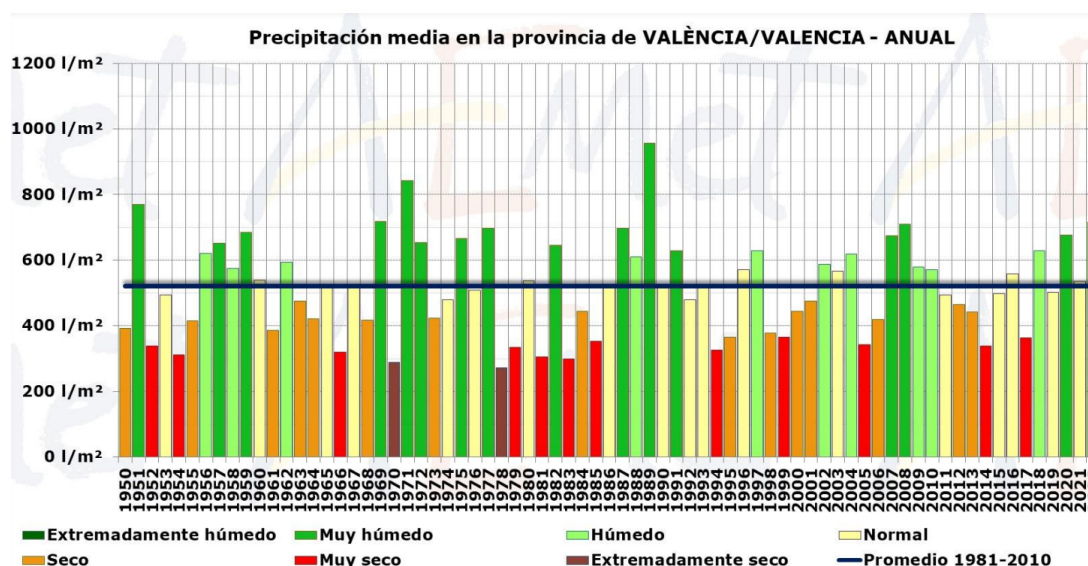


Figura 6.6: Precipitación media anual en la provincia de Valencia (1950-2022). Fuente: [AEMET, 2022]. [AEMET].

Esta consideración adquiere especial importancia en áreas urbanas, como en nuestro caso, donde la construcción de infraestructuras elevadas sobre la superficie surge como una solución común ante la amenaza de experimentar posibles inundaciones de la superficie dependiendo de

la intensidad de las lluvias características de la zona. Si bien es cierto, esta acumulación de agua podría tener impactos significativos tanto en las operaciones aéreas como en la carga estructural de la instalación de igual forma.

En este caso, se han analizado los datos históricos correspondientes a las precipitaciones medias anuales experimentadas en la ciudad de Valencia en los últimos 70 años. De acuerdo a los datos recogidos, el valor medio de precipitación en la provincia de Valencia alcanza los  $520 L/mm^2$ , según los datos proporcionados por la *Agencia Estatal de Meteorología* para este intervalo de tiempo y como puede observarse en la Figura 6.6.

Por otro lado, las precipitaciones se encuentran distribuidas a lo largo de un período de 10 meses, principalmente comprendida entre el 18 de agosto y el 17 de junio, siendo el mes de octubre el que representa un promedio mensual mayor de  $73 mm$ . De igual forma, octubre también representa el mes del año con mayores días promedio de precipitación con hasta 5.5 días del mes.

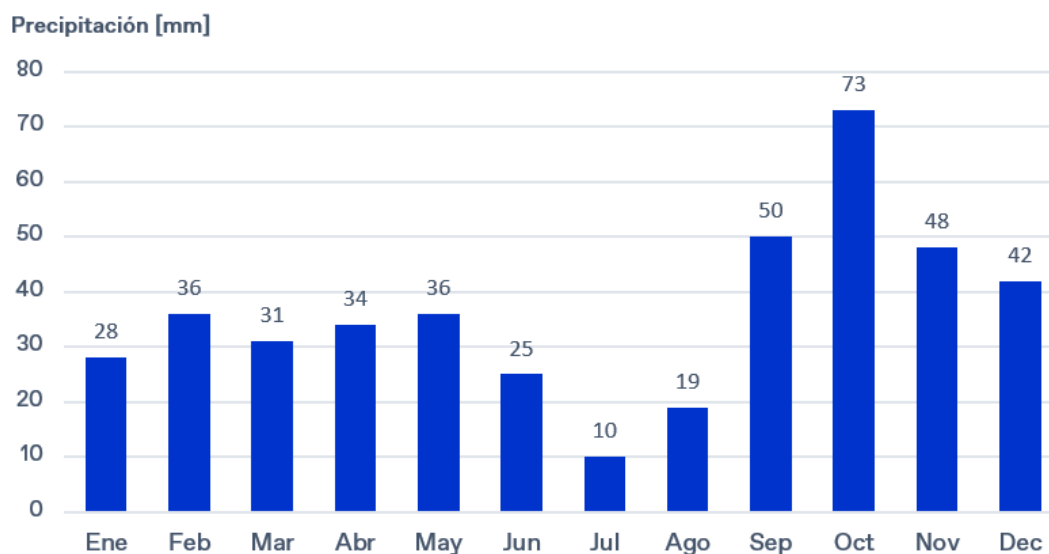


Figura 6.7: Precipitación media mensual medida en mm. Fuente: [AEMET].

En cambio, se estima la duración del periodo seco del año en 2 meses comprendidos entre el 17 de junio y el 18 de agosto, siendo julio el mes que representa una menor tasa de lluvia con un total de  $10mm$  de precipitación y 1,2 días promedio de lluvia.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic
Días	3,5d	3,2d	3,5d	4,3d	3,7d	2,2d	1,2d	2,1d	4,3d	5,5d	4,3d	3,8d

Tabla 6.10: Días promedio mensuales de lluvia en Valencia. Fuente: [AEMET].

En lo correspondiente a la humedad, se tomará el punto de rocío como parámetro de referencia para llevar a cabo la evaluación de esta característica climatológica de modo que, cuando el punto de rocío presenta valores escasos, se percibe un ambiente más seco, mientras que valores altos indican una mayor humedad. A diferencia de la temperatura, que puede variar ampliamente entre el día y la noche, el punto de rocío cambia de manera más gradual. Esto significa que en días húmedos, la noche también tiende a ser húmeda, incluso si la temperatura disminuye.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic
Días	0,0d	0,0d	0,0d	0,0d	0,9d	8,1d	20,2d	23,0d	13,9d	3,1d	0,2d	0,0d

Tabla 6.11: Días promedio mensuales de bochorno en Valencia. Fuente: [AEMET].

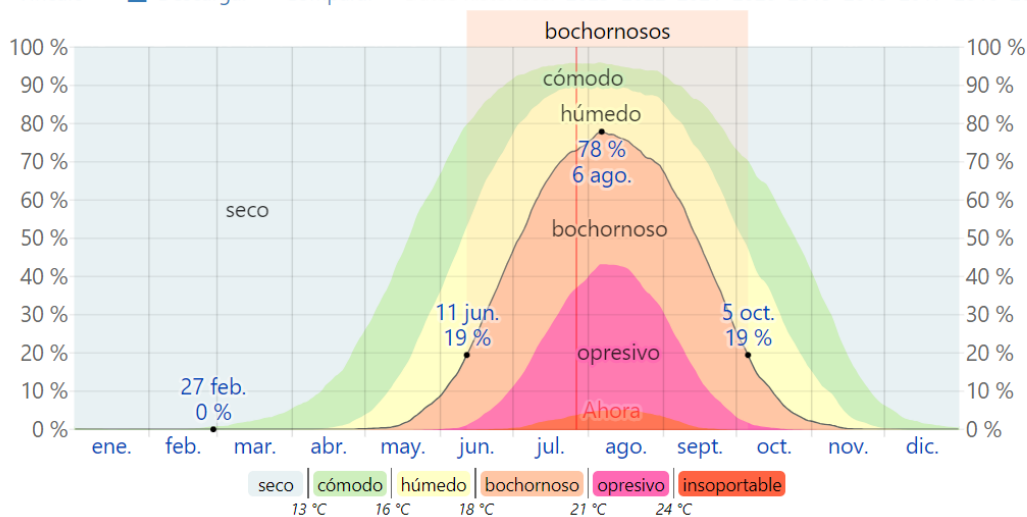


Figura 6.8: Evaluación de la humedad promedio en la ciudad de Valencia. Fuente: [AEMET].

En Valencia, la percepción de humedad experimenta cambios extremos a lo largo del año. El período más húmedo abarca aproximadamente 3,8 meses, desde el 11 de junio hasta el 5 de octubre. Durante este intervalo de tiempo, el 19% del tiempo será de carácter bochornoso, opresivo o insoportable. En particular, agosto destaca como el mes con más días de estas condiciones, sumando un total de 23,0 días bochornosos o peores.

### 6.2.5. Estudio de visibilidad y nubosidad.

En el estudio correspondiente a la nubosidad del cielo de Valencia, el porcentaje promedio de cielo cubierto con nubes experimenta notables variaciones a lo largo del año. La época más despejada inicia alrededor del 14 de junio, extendiéndose por unos 2,7 meses hasta aproximadamente el 5 de septiembre. Durante este período, el cielo se muestra mayormente despejado, con nubes parciales que no ocupan gran parte del espacio.

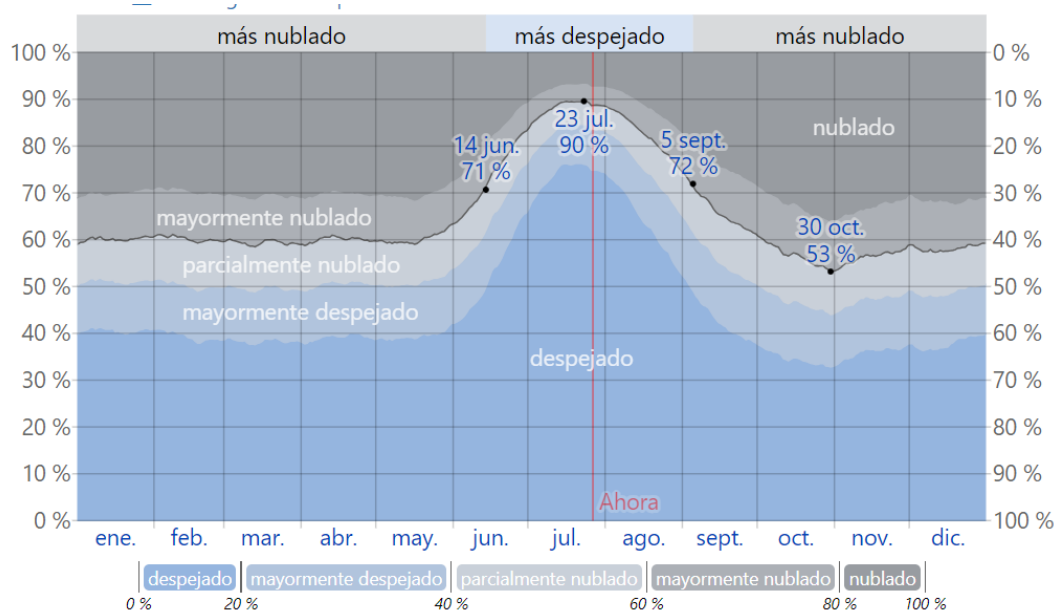


Figura 6.9: Categorías de nubosidad en Valencia. Fuente: [AEMET].

Fracción	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct.	nov	dic
Nubl.	40 %	40 %	41 %	40 %	40 %	26 %	12 %	18 %	34 %	44 %	44 %	42 %
Desp.	60 %	60 %	59 %	60 %	60 %	74 %	88 %	82 %	66 %	56 %	56 %	58 %

Tabla 6.12: Distribución mensual promedio entre cobertura nublada y despejada. Fuente: [AEMET].

El mes más despejado del año en Valencia es julio, destacando por tener el cielo despejado, mayormente despejado o con nubes parcialmente dispersas aproximadamente el 88 % del tiempo.

En contraste, la etapa más nublada del año comienza hacia el 5 de septiembre y se extiende por unos 9.3 meses, finalizando alrededor del 14 de junio. Durante este largo periodo, el cielo se ve afectado por la presencia de nubes, que pueden ser de tipo nublado o mayormente nublado aproximadamente el 44 % del tiempo.

Estos datos resaltan la notable variabilidad en la cantidad de nubosidad a lo largo del año en Valencia, lo que influye significativamente en el clima y las condiciones atmosféricas de la región.

Por otro lado, con el objetivo de abordar el estudio de visibilidad del proyecto, se ha tomado como datos de referencia los proporcionados por el *Plan Director del Aeropuerto de Valencia*, el cual proporciona estos datos según la estación meteorológica del aeropuerto y que, en gran parte, presentará similitudes con el emplazamiento objetivo.

VISIBILIDAD (m)	ALTURA DE NUBES (m)											TOTAL	
	0-29	30-59	60-89	90-119	120-149	150-179	180-239	240-299	300-449	450-899	900-2399		>2399 y/o 4/8 ó
0-199	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01
200-299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300-399	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400-499	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500-599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
600-799	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
800-999	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01	-	0,01	0,03
1000-1199	-	-	-	-	-	-	0,01	-	0,02	0,06	0,01	0,01	0,11
1200-1599	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,01	0,12
1600-2099	-	-	-	-	-	-	0,02	0,03	0,08	0,15	0,09	0,06	0,43
2100-2499	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2500-4799	-	-	-	-	-	-	0,02	0,01	0,19	0,07	0,83	0,81	2,93
4800-8999	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,07	1,46	1,99	2,16	5,69
>9000	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03	2,14	5,42	83,02	90,61
TOTAL	-	0,01	-	-	-	-	0,06	0,06	0,41	4,95	8,36	86,18	99,93

Figura 6.10: Datos de visibilidad y altura de nubes en el Aeropuerto de Valencia. Fuente: [AENA, 2010]

Por tanto, en base a los valores representados en la Figura 6.10, se deduce que el vertipuerto, climatológicamente hablando, supera los mínimos de operación exigidos por los requisitos fijados para operar en Categoría I en un 99,92 % de las ocasiones al proporcionar una visibilidad superior a 800 m y altura base de nubes superior a 60 m.

# Capítulo 7

## Subsistemas de movimiento de aeronaves

En este capítulo, abordaremos el importante proceso de dimensionamiento de superficies para el vertipuerto en la ciudad de Valencia. El objetivo principal de este apartado consiste en diseñar las áreas correspondientes al vertipuerto de acuerdo con los parámetros obtenidos en base a la selección de la aeronave de diseño, que constituye el primer paso de este capítulo.

El diseño de las superficies del vertipuerto es esencial para asegurar su funcionamiento seguro y eficiente. Se considerarán diversos aspectos, como las dimensiones correspondientes a las áreas de aproximación y contacto, seguridad operacional, las áreas de estacionamiento de aeronaves y la configuración del vertipuerto.

Para llevar a cabo este proceso, se utilizarán criterios y normativas establecidas por las autoridades aeronáuticas competentes, asegurando el cumplimiento de los estándares de seguridad y operatividad, basando los requisitos de diseño en las normativas publicadas por la *EASA* en el documento *PTS-VPT-DSN*, correspondiente a “Especificaciones técnicas del prototipo para el diseño de vertipuertos VFR para operaciones con aeronaves tripuladas con capacidad eVTOL” [EASA, 2022]. Además, se tendrán en cuenta las características y requisitos específicos de la aeronave seleccionada, considerando su tamaño, peso, capacidad de despegue y aterrizaje vertical, entre otros aspectos relevantes.

El diseño de las superficies también considerará la integración del vertipuerto en un entorno urbano. Se buscará minimizar el impacto ambiental y maximizar la eficiencia en la utilización del espacio disponible, teniendo en cuenta la distribución y accesibilidad de las diferentes áreas dentro del vertipuerto a través de la selección de su distribución en planta, garantizando su adecuación a las necesidades de la aeronave seleccionada y cumpliendo con los estándares de seguridad y operación. Este proceso sentará las bases para el diseño y desarrollo de un vertipuerto funcional, seguro y en armonía con su entorno, contribuyendo a una mayor movilidad aérea y sostenible en la ciudad de Valencia.

### 7.1. Aeronave de diseño.

El diseño de superficies de las infraestructuras aeronáuticas viene dado principalmente por las dimensiones de las aeronaves que lo operan. En el caso de los vertipuertos, sus características físicas son dimensionadas en base al valor  $D$  que representa su aeronave de diseño. La *EASA*, define este valor en el documento *PTS-VPT-DSN*, como “el diámetro definido por la mínima circunferencia que encierra la proyección de la aeronave VTOL en el plano horizontal, mientras la aeronave se encuentra en configuración de despegue o aterrizaje” [EASA, 2022].

Con el objetivo de garantizar la posible operación de diferentes conceptos eVTOL, se ha procedido a la identificación de la aeronave que presente aquellas especificaciones de diseño más restrictivas para la obtención del parámetro  $D$  de diseño. Es necesario tener en cuenta que,



en el ámbito de la movilidad aérea urbana, los diferentes modelos de aeronaves eVTOL aún se encuentran en fases tempranas de desarrollo, por lo que la variedad de especificaciones presente en los diferentes conceptos propuestos al principio del estudio, podría variar en el futuro. Por ello, el estudio se ha centrado en la comparación de las tres propuestas más avanzadas en los aspectos correspondientes a la certificación por parte de las entidades competentes: Joby, Lilium y Volocopter.

Concepto	Longitud	Envergadura	MTOW
Joby S4	7,3 m	10,7 m	2.404 kg
Lilium Jet	8 m	13,9 m	3.175 kg
Volocity	11,3 m	11,3 m	900 kg

Tabla 7.1: Comparación de parámetros de diseño entre las tres propuestas más avanzadas.

Además del valor  $D$ , la normativa menciona que la aeronave VTOL de diseño debe atender al modelo “*al que está destinado el vertipuerto, que tiene el mayor conjunto de dimensiones, la mayor masa máxima de despegue (MTOW) y los criterios más críticos para evitar obstáculos*”, [EASA, 2022]. Por lo tanto, observando la Tabla 7.1, la propuesta presentada por Lilium Jet no solo representa las mayores distancias correspondientes a envergadura y longitud, sino que además también presenta el valor de MTOW más restrictivo de los 3 conceptos.

De esta manera, se han representado las dimensiones de envergadura y longitud que caracterizan a la aeronave Lilium Jet, con el objetivo de hallar la mínima circunferencia capaz de encerrar toda la superficie de la aeronave, obteniendo un valor  $D = 14,14 m$ , representado en la siguiente figura:

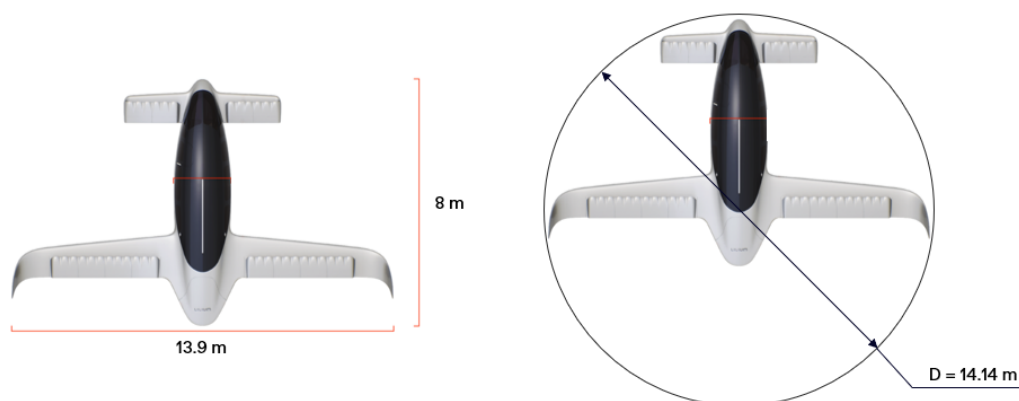


Figura 7.1: Dimensiones de la aeronave de diseño y valor D correspondiente.

## 7.2. Área de aproximación final y despegue (FATO).

El diseño de la FATO debe cumplir con una serie de requisitos técnicos que garantizan la seguridad y la viabilidad operativa del vertipuerto. Estos requisitos se basan en directrices internacionales y se enfocan en proporcionar un espacio adecuado para la aeronave VTOL durante las fases finales de aproximación y al inicio del despegue. Es necesario mencionar que todos los cálculos relacionados con el diseño de esta superficie se encuentran condicionados a que no habrá más de un eVTOL al mismo tiempo en la FATO.

En primer lugar, es fundamental que la FATO proporcione un área libre de obstáculos, con excepción de aquellos objetos esenciales que, debido a su función, deben ubicarse en este espacio como ayudas visuales, sistemas de iluminación y otros dispositivos necesarios por motivos de seguridad, como sistemas contra incendios.



Además, cuando la FATO se encuentra definida por superficie sólida, se requiere que sea resistente a los efectos de la corriente descendente generada por la aeronave. Esto implica que la superficie debe ser capaz de soportar las cargas previstas y garantizar un drenaje efectivo. Además, en el caso de que la FATO esté colocado junto a una Zona de Aterrizaje y Despegue (TLOF), debe ser contiguo y estar al ras de la TLOF, formando una superficie continua y con una resistencia adecuada. Por el contrario, si esta no está situada junto a una TLOF, debe estar libre de peligros en caso de que se requiera un aterrizaje forzoso.

Las dimensiones de la FATO también son un aspecto importante a tener en cuenta en su diseño. Estas dimensiones se determinan en función de la longitud de la Trayectoria de Despegue y Aterrizaje Restringida (RTODV) requerida por la aeronave VTOL y del ancho necesario para los procedimientos establecidos en el manual de vuelo de la aeronave. En general, se considera que el FATO debe tener una longitud igual a la RTODV o al 1,5 veces el valor del parámetro  $D$  de diseño, considerando el factor más restrictivo de ambos criterios.

Por otro lado, es importante destacar que los objetos esenciales ubicados dentro del FATO no deben penetrar el plano horizontal en más de 5 cm, garantizando que no haya interferencias o peligros para la aeronave durante las operaciones en esta área.

De este modo, tomando como referencia el parámetro  $D = 14,14\text{ m}$  correspondiente a la aeronave de referencia para el dimensionamiento de este vertipuerto, se estima una dimensión mínima de  $d = 21,21\text{ m}$  para la FATO, tal que:

$$d_{FATO} = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 14,14 = 21,21\text{m} \approx \mathbf{21,30\text{ m}} \quad (7.1)$$

En último lugar, la normativa recomienda para esta superficie una pendiente no superior al 2% en ninguna dirección de la FATO, aunque podría aumentarse esta consideración según al AFM.

### 7.3. Área de seguridad operacional (SA).

El área de seguridad (SA) tiene como objetivo garantizar la ausencia de obstáculos y proporcionar un entorno seguro para las operaciones de las aeronaves VTOL. Para cumplir con su propósito, la SA debe cumplir con criterios específicos relacionados con su dimensión y características.

En primer lugar, la SA debe extenderse más allá del Área de Aproximación Final y Despegue (FATO) para compensar posibles errores de maniobra y condiciones ambientales desafiantes. Esta extensión debe ser de al menos 3 metros o el 0,25 del valor de diseño  $D$ , eligiendo como criterio el más restrictivo de ambos dos.

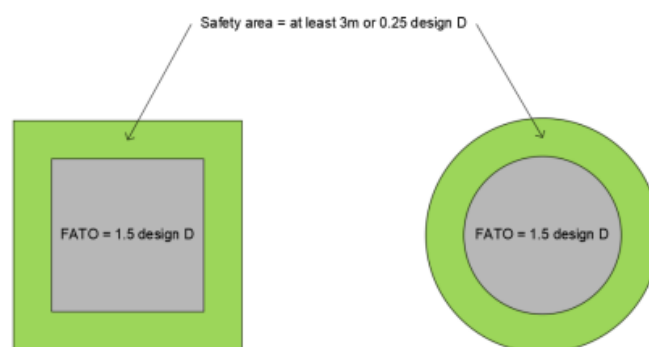


Figura 7.2: Requisitos de diseño para el dimensionamiento de la FATO. Fuente: [EASA, 2022].

$$d_{SA} = 0,25 \cdot D = 0,25 \cdot 14,14 = 3,54m \approx \mathbf{3,6 \text{ m}} \quad (7.2)$$

Para el caso del vertipuerto planteado y su aeronave de referencia, la condición definida a partir del parámetro  $D$  presenta unas características más restrictivas que la distancia mínima, por lo que permite definir el área correspondiente al área de seguridad con  $3,6 \text{ m}$ .

Por otro lado, la SA debe mantenerse libre de obstáculos, a excepción de aquellos objetos esenciales necesarios para garantizar la seguridad de las operaciones. Estos objetos esenciales pueden incluir elementos visuales de ayuda, como iluminación, o sistemas de protección contra incendios, aunque debe garantizarse que no sobrepasen la superficie formada a partir del borde de la FATO a una altura de  $25 \text{ cm}$  por encima de su plano y hacia afuera con una pendiente del  $5\%$ , evitando cualquier interferencia o penetración de dichos objetos en el espacio destinado a las operaciones de las aeronaves VTOL.

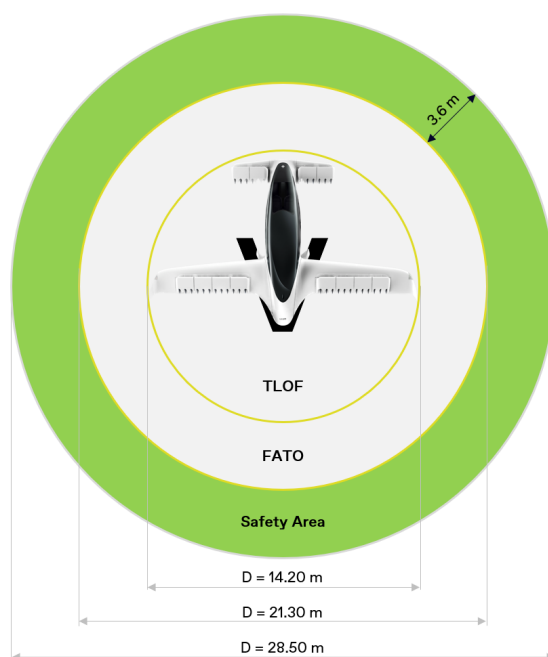


Figura 7.3: Dimensionamiento de la Fato y área de seguridad.

Si la SA se construye como una superficie sólida, debe ser contigua y estar al mismo nivel que el FATO. Esto asegura una transición suave y sin obstáculos entre ambas áreas, evitando irregularidades o cambios bruscos en la superficie de despegue y aterrizaje. Además, de igual forma a la FATO, la superficie sólida de la SA debe ser resistente a los efectos de la corriente descendente generada por las aeronaves VTOL y permitir un drenaje efectivo para evitar la acumulación de agua.

En cuanto a la pendiente de la SA, en el caso de una superficie sólida, esta no debe exceder el  $4\%$  de pendiente ascendente desde el borde del FATO, asegurando una transición segura y gradual entre la FATO y la SA, evitando cambios bruscos en la elevación que puedan afectar negativamente las operaciones de las aeronaves VTOL.

## 7.4. Protección ante el downwash.

Este criterio de diseño viene condicionado por el valor de downwash ejercido por la aeronave eVTOL y que viene representado en el AFM. El downwash viene definido como la velocidad ejercida por la propulsión de la aeronave en una circunferencia de tamaño equivalente a dos

veces el parámetro de diseño  $D$  mientras la aeronave se encuentra elevada a  $1\text{ m}$  de altura sobre el suelo. En el caso de que la velocidad experimentada dentro de este área supera las recomendaciones establecidas por la regulación, deberá definirse un área adicional de protección frente al downwash.

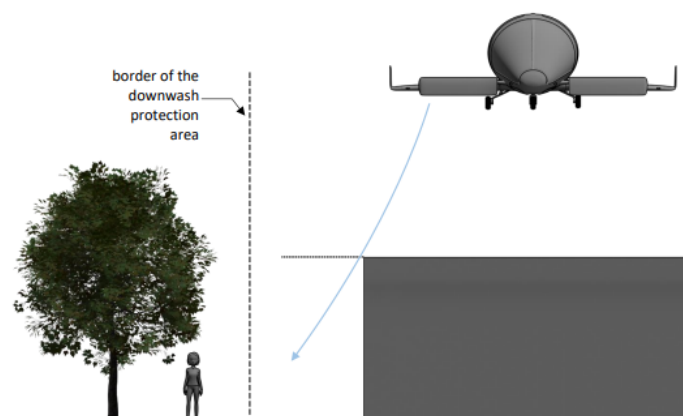


Figura 7.4: Extensión del área de protección de downwash para vertipuertos elevados. Fuente: [EASA, 2022].

Además, para el caso de los vertipuertos elevados será necesario prolongar los límites de este área hasta niveles por debajo de aquellos en los que se sitúa la FATO. Es decir, al plantear el vertipuerto en la parte superior de un edificio, el área de protección frente al downwash deberá prolongarse hasta el suelo con el objetivo de aumentar la seguridad. Debido a que este estudio carece de la velocidad de downwash ejercida por la aeronave a la altura requerida por la normativa, se planteará una distancia de protección correspondiente a la prevista de  $2D$ , tal que:

$$d_{Downwash} = 2 \cdot D = 2 \cdot 14,14 = 28,28\text{m} \approx \mathbf{28,3\text{ m}} \quad (7.3)$$

## 7.5. Área de toma de contacto y elevación inicial (TLOF).

El área de toma de contacto y elevación inicial tiene como propósito garantizar el diseño de un área de conveniente tamaño y forma adecuados para contener el tren de aterrizaje de la aeronave de referencia elegida para el dimensionamiento del vertipuerto. Un requisito importante para el diseño de esta superficie reside en que se debe proporcionar de manera imprescindible al menos un TLOF para cada vertipuerto, la cual se encontrará ligada a una FATO, una calle de rodaje o plataforma de estacionamiento.

Las dimensiones mínimas que caracterizan este área se definen como una distancia equivalente a  $0,83$  veces el parámetro  $D$  o las dimensiones requeridas según el Manual de Vuelo de la aeronave VTOL (AFM) para la cual está destinado la TLOF, eligiendo el criterio más restrictivo. En el caso de un vertipuerto elevado, las dimensiones mínimas de una TLOF situada dentro de una FATO deben ser lo suficientemente grandes para contener una circunferencia definida por un diámetro de al menos  $1$  veces el parámetro  $D$  de diseño. Además, para aquellas TLOF situadas dentro de una FATO, esta debe encontrarse centrada en el FATO o, en el caso de un FATO alargado, centrado respecto al eje longitudinal.

En relación al caso de estudio planteado, la configuración del vertipuerto se encontrará elevada como consecuencia del escaso espacio del emplazamiento seleccionado en el entorno urbano. Por este motivo, el dimensionamiento de este área se corresponderá con el del parámetro  $D$  de diseño, con un valor de  $14,14\text{ m}$ .

$$d_{TLOF} = 1 \cdot D = 14,14m \approx \mathbf{14,2 m} \quad (7.4)$$

Asimismo, la superficie del TLOF debe tener suficiente resistencia para soportar las cargas dinámicas asociadas al tipo de aterrizaje previsto de la aeronave VTOL en la superficie dimensionada, además de estar libre de irregularidades que puedan afectar adversamente el aterrizaje o despegue de las aeronaves y cuyo pavimento debe presentar suficiente fricción para evitar el deslizamiento de las aeronaves o deslizamiento de personas.

## 7.6. Pendiente lateral de protección.

Un vertipuerto deberá contar, al menos, con una pendiente lateral protegida desde el borde del área de seguridad definida previamente que se extenderá verticalmente con un ángulo de  $45^\circ$  hacia el exterior y horizontalmente hasta alcanzar una distancia de 10 m.

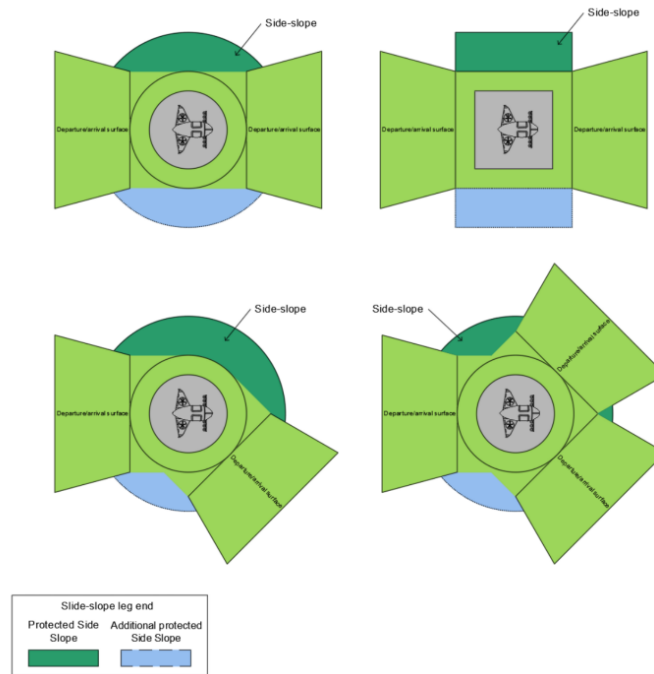


Figura 7.5: Configuraciones de pendiente lateral de protección según complejidad de distribución respecto a las FATO y SA. Fuente: [EASA, 2022].

Sin embargo, es recomendable disponer de más de una de estas pendientes laterales protegidas, en cuya superficie no se permitirá la presencia de obstáculos.

En la Figura 7.5, se presentan diagramas que ilustran diferentes configuraciones de pendientes laterales de protección de acuerdo a lo expuesto en el documento *PTS-VPT-DSN*.

## 7.7. Calles de rodaje.

Para el dimensionamiento de las calles de rodaje a implementar en el vertipuerto, la normativa plantea diferentes requisitos de diseño, mencionando que la anchura de la calle debe ser la menor distancia correspondiente a:

- Dos veces la longitud correspondiente a la distancia del tren de aterrizaje (UCW) de la aeronave más restrictiva; o

- una zona libre de obstáculos y de anchura suficiente para garantizar la contención y desviaciones de rodaje del tren de aterrizaje de las aeronaves con capacidad VTOL más exigentes.

En el caso de aplicación planteado, el tren de aterrizaje de la aeronave de referencia se caracteriza por tener un ancho de  $2,25\text{ m}$  entre ejes. Por lo tanto, el ancho de las calles de rodaje para el vertiportuerto tendrán como mínimo  $4,5\text{ m}$  de anchura.

$$w_{taxiway} = 2 \cdot w_{UCW} = 2 \cdot 2,25 = 4,5\text{ m} \quad (7.5)$$

Una vez determinado el ancho mínimo que determina las calles de rodaje, es necesario considerar las limitaciones correspondientes a la pendiente, siendo un  $2\%$  la máxima inclinación posible para la componente transversal y un  $3\%$  en el caso de la longitudinal.

Por otro lado, la distancia de separación entre calles de rodaje es un elemento que atiende a varios criterios de diseño. En primer lugar y atendiendo a la separación entre calles de rodaje en tierra, será necesario determinar las siguientes dimensiones mínimas:

- una longitud correspondiente al  $0,75$  de la máxima anchura definida por la aeronave de referencia aplicada a la separación del eje central de la calle de rodaje y un objeto móvil o fijo, y
- una longitud igual a  $1,25$  el valor de la máxima anchura definida por la aeronave de referencia entre los ejes de ambas calles de rodaje.

Considerando la envergadura como el parámetro de la aeronave que mayor ancho representa y representado como  $b$ , se obtiene:

$$d_{taxiways} = 1,25 \cdot b = 1,25 \cdot 13,9 = 17,38\text{m} \approx 17,40\text{ m} \quad (7.6)$$

Además, se deberá tener en consideración un espacio libre entre puntas de ala igual a  $0,25$  del parámetro de diseño  $D$ . De esta manera, se efectúan los siguientes cálculos:

$$w_{clearance} = 0,25 \cdot D = 0,25 \cdot 14,14 = 3,54\text{m} \approx 3,60\text{ m} \quad (7.7)$$

Con esta información, en la Figura 7.6 se puede plantear un esquema representativo en base a las distancias calculadas en referencia a las calles de rodaje para el vertiportuerto.

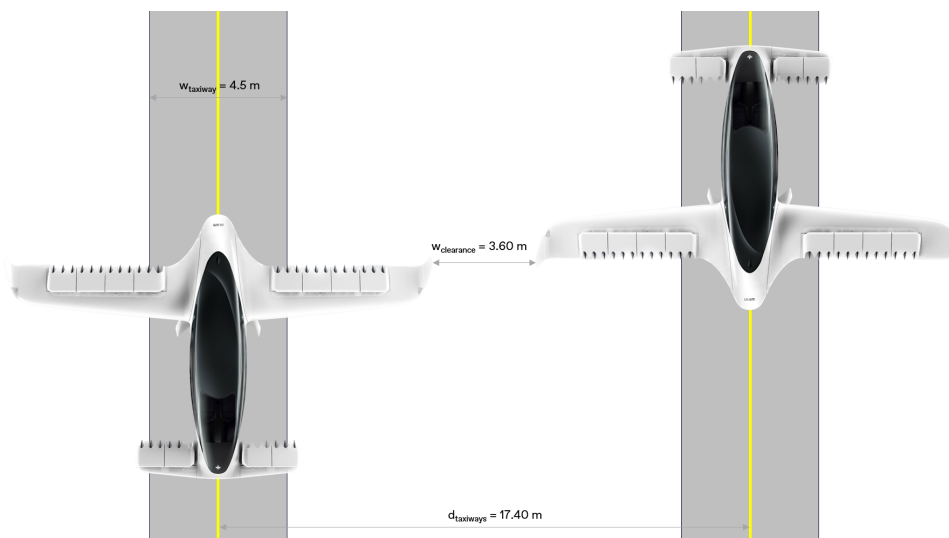


Figura 7.6: Distribución correspondiente al dimensionado de las calles de rodaje para el vertiportuerto planteado.

## 7.8. Rutas de rodaje.

En el momento de definir la superficie requerida para el trazado de una ruta de taxi a través de las calles de rodaje, se necesita establecer una diferenciación entre rutas en tierra o rutas aéreas, siendo esta tipología determinante para definir los requisitos mínimos de diseño.

### 7.8.1. Rutas de taxi en tierra.

De acuerdo a lo establecido en la normativa, el ancho mínimo de una ruta de taxi terrestre para aeronaves eVTOL debe ser de al menos 1,5 veces el ancho total de la aeronave más grande que utilizará la ruta, la cual debe encontrarse centrada respecto a la calle de rodaje, proporcionando una guía clara y precisa para el desplazamiento de las aeronaves.

Además, los objetos esenciales ubicados no deben estar ubicados a una distancia inferior a 50 *cm* desde el borde de la calle de rodaje ni deben penetrar la superficie originada a 50 *cm* hacia afuera desde el borde de la calle de rodaje y a una altura de 25 *cm* por encima de la misma, inclinándose verticalmente con un gradiente del 5% hasta el borde exterior de la ruta.

$$w_{route_{ground}} = 1,5 \cdot b = 1,5 \cdot 13,9 = 20,85m \approx \mathbf{20,9\ m} \quad (7.8)$$

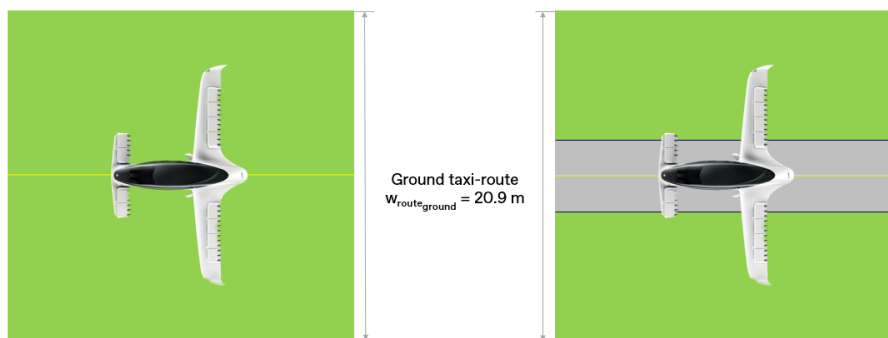


Figura 7.7: Dimensionado de las rutas de taxi en tierra para el vertipuerto planteado.

### 7.8.2. Rutas de taxi aéreas.

En lo correspondiente a las rutas aéreas, el ancho mínimo se caracteriza por ser de al menos 2 veces el ancho total de la aeronave más grande que utilizará la ruta, la cual también debe encontrarse centrada respecto a la calle de rodaje. Asimismo, la ubicación de los objetos esenciales siguen la misma distribución que en el caso anterior.

$$w_{route_{air}} = 2 \cdot b = 2 \cdot 13,9 = \mathbf{27,8\ m} \quad (7.9)$$

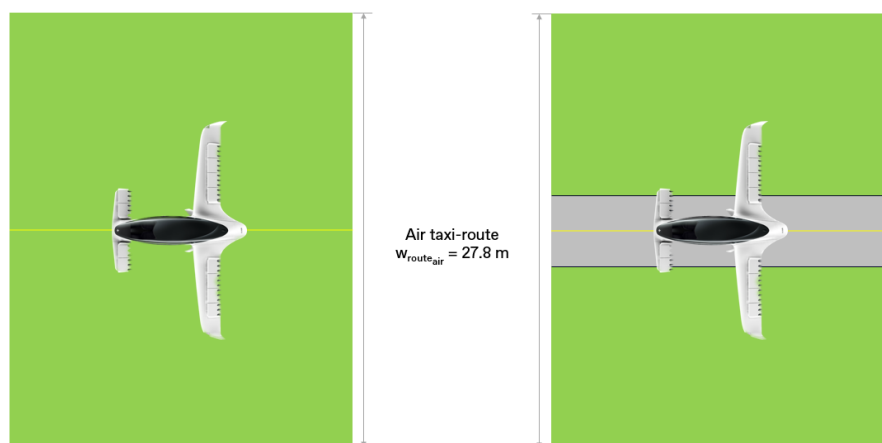


Figura 7.8: Dimensionado de las rutas de taxi aéreas para el vertipuerto planteado.

Para este proyecto, se tomará como elemento de diseño aquel que representa un carácter más restrictivo en el impacto de diseño del vertipuerto, siendo este requisito el correspondiente a la definición de superficies para el trazado de rutas aéreas de taxi planteado en la Figura 7.8.

## 7.9. Puestos de estacionamiento.

Para llevar a cabo el dimensionamiento de los puestos de estacionamiento a albergar por el vertipuerto, la normativa menciona criterios de diseño independientes a la anchura y longitud correspondientes que definen el propio área de estacionamiento. Estos criterios comprenden la pendiente máxima que puede representar la plataforma, considerando un máximo del 2% de inclinación en cualquiera de las direcciones posibles y, en lo referente a emplazamiento de dichos puestos, se desaconseja su ubicación bajo una trayectoria de vuelo como consecuencia de un posible efecto del downwash procedente de la operación de la aeronave. Por otro lado, el diseño del área de estacionamiento puede realizarse en base a dos criterios principales: el parámetro  $D$  de diseño o la geometría de la aeronave a emplear. En este caso, se ha optado por el diseño basado en el parámetro  $D$ , cuya metodología se recomienda para aquellas aeronaves que precisen de realizar maniobras de giro para su salida o entrada en el puesto de estación. Aunque el concepto eVTOL propuesto por Lilium permite realizar una maniobra de push-back, el vertipuerto busca permitir la operación de diferentes aeronaves, motivo por el cual se decide dimensionar en base al parámetro  $D$ . De esta manera, se exige el diseño de un área de circunferencia mínima equivalente a 1,2 veces el parámetro  $D$  de diseño.

$$d_{stand} = 1,2 \cdot D = 1,2 \cdot 14,14 = 16,97m \approx \mathbf{17,00\ m} \quad (7.10)$$

Por lo tanto, se obtiene una superficie circular de un total de 17 m para el diseño de los puestos de estacionamiento. Cabe destacar que, en el caso de plantear un puesto de estacionamiento auxiliar destinado exclusivamente a un uso habitual como en operaciones taxi-through, el área de estacionamiento puede ser inferior al planteado para las posiciones principales, si bien no puede ser inferior al ancho correspondiente a la ruta de taxi planteada en ese tramo.

### 7.9.1. Área de seguridad del puesto de estacionamiento.

De igual forma a lo requerido en el dimensionamiento de la FATO, el diseño de los puestos de estacionamiento en función del parámetro  $D$  requiere de la existencia de un área de seguridad que garantice el espacio libre entre punta de ala frente a objetos y otras aeronaves al

plantear configuraciones con múltiples estacionamientos. En este caso, el área de seguridad operacional deberá extenderse una distancia de  $0,4D$  hacia el exterior respecto a la circunferencia correspondiente al puesto de estacionamiento.

$$l_{SA_{stand}} = 0,4 \cdot D = 0,4 \cdot 14,14 = 5,66m \approx \mathbf{5,70 \text{ m}} \quad (7.11)$$

$$d_{SA_{stand}} = d_{stand} + l_{SA_{stand}} = 17,00 + 2 \cdot 5,70 = \mathbf{28,4 \text{ m}} \quad (7.12)$$

Por otro lado, en lo correspondiente a los objetos esenciales ubicados dentro del área de protección del puesto de estacionamiento, no deberán penetrar la superficie a una distancia de menos de  $0,75 D$  desde el centro del puesto, a una altura de  $5 \text{ cm}$  sobre la superficie de la zona central. En el supuesto de encontrarse a una distancia de  $0,75 D$  o más desde el centro del puesto, no deberán penetrar una superficie a una altura de  $25 \text{ cm}$  sobre el plano de la zona central, con una pendiente ascendente del  $5\%$ .

## 7.10. Localización y separación entre FATOs.

En lo referente al establecimiento de una distancia mínima entre dos FATOs, la separación mínima deberá ser verificada mediante una evaluación de seguridad que disponga de la segura operación sin afectar negativamente la seguridad. Para ello, el capítulo *PTS VPT-DSN.C.340* toma como referencia la normativa correspondiente a helipuertos, donde refiere una separación de  $60 \text{ m}$  entre dos FATOs como distancia de referencia para operaciones de despegue y aterrizajes simultáneas siempre y cuando ambos procedimientos no entren en conflicto y el peso máximo al despegue de ambas aeronaves no exceda los  $3.175 \text{ kg}$ . De esta forma, debido al cumplimiento de las restricciones planteadas por parte de la aeronave de referencia, se establece en  $60 \text{ m}$  la distancia mínima entre FATOs para el vertiport.



# Capítulo 8

## Servidumbres

Durante la planificación y diseño de vertipuertos, es de vital importancia garantizar la seguridad de las operaciones aéreas. Una de las áreas fundamentales en este sentido consiste en la definición de las superficies de protección frente a los obstáculos en las diferentes trayectorias y procedimientos requeridos para la operación del vertipuerto, permitiendo un espacio seguro de maniobra y despegue/aterrizaje de las aeronaves eVTOL.

La identificación y el dimensionamiento adecuado de estas superficies es esencial para minimizar los riesgos asociados con la presencia de obstáculos, como edificios, torres, árboles u otros elementos estructurales. En este capítulo, se abordará en detalle el diseño y los requisitos correspondientes al entorno de obstáculos con el objetivo de asegurar la seguridad operativa de los vertipuertos y garantizar el cumplimiento de las normativas y estándares establecidos, según lo descrito en el capítulo *PTS-VPT-DSN, Chapter D, Subpart 1*.

Este capítulo de la normativa comprende dos apartados bien diferenciados: superficies de limitación de obstáculos (OLSs) y volumen libre de obstáculos (OFV). La normativa contemplada en el primero de los campos basa su contenido en los requisitos convencionales planteados en el *Anexo 14, Volumen II, Helipuertos, Capítulo 4* y en el *Documento 9261 OACI, Manual de Helipuertos*. Por otro lado, la fase correspondiente a los OFVs proporciona una solución para facilitar la implementación de esta infraestructura en entornos urbanos y propone un concepto de limitación de los obstáculos en el entorno de operación basado en configuraciones de despegue y aterrizaje verticales que favorezcan la maniobrabilidad de las aeronaves eVTOL en núcleos urbanos.

Por otro lado, el diseño de las superficies y volúmenes libres de obstáculos se encuentra condicionado por las condiciones de operación para las maniobras de aproximación y ascenso en el despegue. En este caso, la normativa recogida en el documento *PTS-VPT-DSN, Chapter D, Subpart 1* hace referencia al diseño de vertipuertos en condiciones VFR y, como consecuencia, el presente proyecto orientará su diseño en base a estas condiciones de operación. Es importante tener en cuenta que, aunque no se haya establecido un horario específico de operación para el vertipuerto, el servicio de aerotaxis estará disponible durante las horas nocturnas. Por lo tanto, debemos considerar las condiciones de vuelo nocturno (NVFR) y enfocarnos en las variantes más restrictivas presentadas por ambos casos.

En último lugar, tomando como referencia su correlación con los requisitos estipulados en el *Manual de Helipuertos*, y debido a que el emplazamiento seleccionado para el vertipuerto se encuentra localizado en un entorno puramente urbano, las aeronaves eVTOL que operen en dichas instalaciones deben presentar un nivel de rendimiento equivalente a la *Clase1*, correspondiente a aquellos “*helicópteros en los cuales, en caso de fallo crítico del grupo motor, pueden aterrizar en la zona de despegue interrumpido o proseguir con el vuelo en condiciones de seguridad hasta llegar a una zona de aterrizaje adecuada dependiendo del momento en que se produzca el fallo*”. Las aeronaves comprendidas dentro de esta clase deberán encontrarse dentro del grupo comprendido como *Categoría A* de certificación.

## 8.1. Superficies limitadoras de obstáculos (OLSs).

Como ya se ha mencionado anteriormente, el vertipuerto debe cumplir con rigurosas condiciones debido a su ubicación en áreas urbanas con edificaciones de gran altura, lo cual puede imponer limitaciones significativas en las trayectorias de las aeronaves. Por esta razón, se establecen varias superficies que restringen la presencia de obstáculos evitando que los objetos cercanos al aeródromo las sobrepasen, entre las cuales se encuentran:

- Superficies de aproximación.
- Superficies de ascenso en el despegue.
- Superficies de transición.

A continuación, se procederá el dimensionamiento de cada una de ellas en función de los requisitos establecidos y los parámetros de diseño de la aeronave de referencia de acuerdo a los siguientes requisitos propuestos:

SURFACE AND DIMENSIONS	SLOPE DESIGN CATEGORIES		
	A	B	C
<b>APPROACH AND TAKE-OFF CLIMB SURFACE:</b>			
Length of inner edge	Width of SA	Width of SA	Width of SA
Location of inner edge	SA boundary (Clearway boundary if provided)	SA boundary	SA boundary
<b>Divergence: (1st and 2nd section)</b>			
Day use only	10 %	10 %	10 %
Night use	15 %	15 %	15 %
<b>First section:</b>			
Length	3 386 m	245 m	1 220 m
Slope	4.5 % (1:22.2)	8 % (1:12.5)	12.5 % (1:8)
Outer width	(b)	N/A	(b)
<b>Second section:</b>			
Length	N/A	830 m	N/A
Slope	N/A	16 % (1:6.25)	N/A
Outer width	N/A	(b)	N/A
Total length from inner edge (a)	3 386 m <sup>c</sup>	1 075 m <sup>c</sup>	1 220 m <sup>c</sup>
<b>TRANSITIONAL SURFACE<sup>d</sup>:</b>			
Slope:	50% (1:2)	50% (1:2)	50% (1:2)
Height:	45 m	45 m	45 m
<p>(a) The approach and take-off climb surface lengths of 3 386 m, 1 075 m and 1 220 m associated with the respective slopes, bring the VTOL-capable aircraft to 152 m (500 ft) above FATO elevation.</p> <p>(b) Seven D-values overall width for day operations or ten D-values overall width for night operations.</p> <p>(c) This length may be reduced if vertical procedures are in place.</p> <p>(d) When the VTOL-capable aircraft procedure includes the lateral element, the transitional surface may be provided.</p>			
<p><b>Note.</b></p> <p>The slope design categories depicted above represent minimum design slope angles and not operational slopes. Consultation with VTOL-capable aircraft operators is needed to determine the appropriate slope category according to the vertiport environment and the VTOL-capable aircraft the vertiport is intended to serve.</p>			

Figura 8.1: Dimensiones y pendientes correspondientes a las OLSs para FATOs en condiciones visuales. Fuente: [EASA, 2022].

### 8.1.1. Generalidades.

Este apartado aborda de manera general los requisitos de diseño para las superficies de aproximación y despegue en los vertipuertos con el fin de establecer los principales criterios para la seguridad de las operaciones de las aeronaves eVTOL y cumplen con los siguientes aspectos:

- **Ascenso sin Obstáculos.**

Se establece como requisito de diseño el establecimiento de una superficie de aproximación y una superficie de ascenso para cada trayectoria de aproximación y despegue hacia o desde cada una de las FATO. Estas superficies están diseñadas de manera que ningún obstáculo pueda interferir con las operaciones de las aeronaves eVTOL durante su aproximación y ascenso.

- **Dimensiones Mínimas.**

Las dimensiones de las superficies de aproximación y despegue varían según el tamaño de la aeronave eVTOL, su gradiente de ascenso, velocidad de aproximación y tasa de descenso. Las dimensiones mínimas se determinan considerando los siguientes criterios:

- Superficie de aproximación: Si se requiere una trayectoria curva, la suma del radio de la curva y la longitud de la porción recta no debe ser inferior a 575 *m*. Se permite tener múltiples secciones curvas separadas por secciones rectas de al menos 150 *m*.
- Superficie de ascenso: En caso de realizar giros, se deben respetar los límites de inclinación y degradación del rendimiento establecidos en el Manual de Vuelo de la aeronave eVTOL.

- **Consideraciones de Obstáculos Permanentes.**

La presencia de obstáculos permanentes, como antenas de radio, edificios o zonas elevadas, puede requerir la implementación de trayectorias curvas o superficies elevadas para evitarlos. Estas trayectorias curvas deben tener en cuenta el rendimiento y la maniobrabilidad de las aeronaves eVTOL, evitando molestias y ruido en áreas pobladas.

- **Adaptación a las Características de la Aeronave.**

Si una aeronave eVTOL puede realizar giros con radios más pequeños y secciones rectas más cortas, se pueden reducir los valores mínimos establecidos. Sin embargo, esto debe estar respaldado por una evaluación de seguridad que demuestre que la reducción no afectará negativamente la seguridad ni la regularidad de las operaciones en el vertipuerto. Esta evaluación de seguridad debe considerar los valores y limitaciones proporcionados en el Manual de Vuelo de la aeronave eVTOL más exigente que operará en el vertipuerto.

### 8.1.2. Integración de espacios de superficie de aproximación o ascenso y el SA.

En el contexto del diseño de superficies limitadoras de obstáculos, uno de los aspectos importantes a considerar es la integración de los espacios entre la superficie de aproximación o ascenso y el área de seguridad (SA). Estos espacios, conocidos como áreas de transición, desempeñan un papel fundamental en la seguridad de las operaciones de las aeronaves eVTOL.

Es crucial que las áreas entre la superficie de aproximación o ascenso y el SA tengan características similares a las del área de seguridad definido previamente, imposibilitando que estas áreas presenten estándares de seguridad inferiores a las superficies adyacentes. Para garantizar la coherencia en el diseño, se establecen referencias visuales como círculos de referencia inscritos dentro de la superficie de aproximación o ascenso y el SA.

Es importante tener en cuenta que las configuraciones básicas pueden sufrir desviaciones. En algunos casos, la dirección planificada de la superficie de aproximación puede no estar alineada con el centro de la zona de aterrizaje y despegue (FATO) o no estar en un ángulo conveniente de 45°. Además, tanto la FATO como el SA pueden tener formas irregulares o dimensiones que

excedan los mínimos requeridos.

Para identificar y delimitar las denominadas como áreas sombreadas, se consideran los bordes laterales que se extienden desde los extremos del borde interno hasta los puntos de intersección con la tangente al círculo de referencia. Por lo tanto, estas áreas sombreadas estarán delimitadas por los bordes laterales, el borde interno y los bordes del área de seguridad.

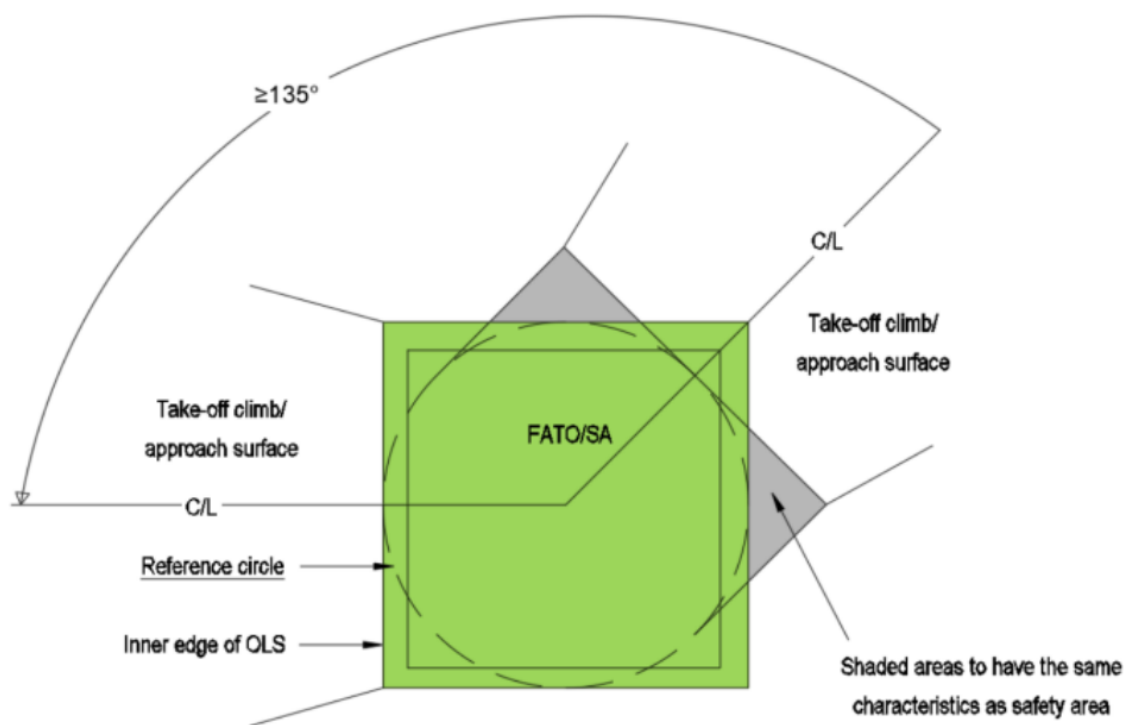


Figura 8.2: Círculo de referencia y separación de superficies por 135°. Fuente: [EASA, 2022].

Por otro lado, en casos específicos como una FATO alargada, pueden existir dos círculos de referencia dentro del SA, ubicados en cada extremo de la superficie de aproximación o ascenso. También se pueden establecer zonas de aclaramiento (clearway) entre la FATO/SA y la superficie de aproximación o ascenso, donde el borde interno de esta última se conectará con la zona de aclaramiento.

La adecuada integración de estas zonas entre la superficie de aproximación o ascenso y el área de seguridad es esencial para garantizar la seguridad de las operaciones de las aeronaves eVTOL. Este enfoque de diseño busca minimizar los riesgos asociados con obstáculos y proporcionar un entorno seguro y eficiente para las maniobras de aterrizaje y despegue.

### 8.1.3. Número y separación de las superficies de aproximación y ascenso.

Conforme a lo realizado en el Punto 6.2.2, este apartado recalca la necesidad de evitar la operación de maniobras en dirección opuesta al viento, además de procurar minimizar las operaciones en condiciones de viento cruzado, garantizando que sea factible llevar a cabo aterrizajes abortados con el menor cambio de dirección posible.

Para asegurar una operatividad óptima, se recomienda que el vertipuerto cuente con al menos dos superficies de despegue, ascenso y aproximación, idealmente separadas por 180°, tal y como se ha planteado previamente en el presente proyecto. En algunos casos, puede ser necesario incluir superficies adicionales de aproximación, siempre y cuando se logre mantener un factor de

utilización del vertipuerto de al menos el 95 % para las aeronaves eVTOL que se atenderán.

Sin embargo, en situaciones particulares en las que no sea posible cumplir con las especificaciones técnicas mencionadas anteriormente, se podría considerar una reducción en la separación entre las superficies o una disminución en el número de superficies de despegue, ascenso y aproximación. Esta decisión solo deberá tomarse tras realizar una evaluación exhaustiva de seguridad que asegure que dicha modificación no comprometerá la seguridad ni afectará significativamente la regularidad de las operaciones de las aeronaves eVTOL en el vertipuerto.

Finalmente, cuando solamente se disponga de una única superficie de aproximación y despegue, será imprescindible llevar a cabo una evaluación de seguridad completa. Esta evaluación deberá tener en cuenta factores como las características geográficas y topográficas del área de vuelo, el entorno de obstáculos cercanos al vertipuerto, la disponibilidad de pendientes laterales protegidas y las condiciones meteorológicas locales, incluyendo la dirección predominante del viento.

#### 8.1.4. Superficie de aproximación y elevación en el despegue.

Debido a que ambas superficies se encuentran definidas de acuerdo a los mismos criterios de diseño, esta sección plantea el diseño de ambas superficies. En primer lugar, la superficie de aproximación se caracteriza por ser un plano inclinado o combinación de planos inclinados mediante una pendiente ascendente desde el extremo del área de seguridad y cuya superficie se encuentra centrada respecto a la FATO mediante su eje que atraviesa el centro de la misma.

Por otro lado, la superficie de elevación en el despegue permite garantizar la seguridad en los procedimientos de despegue de forma que los objetos presentes en el entorno no supongan un obstáculo para la trayectoria definida.

Por lo tanto, ambos cálculos se basarán en los siguientes parámetros:

<b>Dimensión</b>	<b>Categoría A</b>
Anchura del borde interior	Ancho SA
Lugar del borde interior	Límite SA / Límite CWY
<i>Primera sección</i>	
Divergencia diurna	10 %
Divergencia nocturna	15 %
Longitud	3.386 m
Pendiente	4,5 %
Anchura exterior diurna	7D
Anchura exterior nocturna	10D
<i>Segunda sección</i>	
Divergencia diurna	10 %
Divergencia nocturna	15 %
Longitud	N/A
Pendiente	N/A
Anchura exterior diurna	N/A
Longitud total desde el borde interior (a)	3.386 m <sup>c</sup>

Tabla 8.1: Dimensiones y pendinetes para la superficie de aproximación y elevación en despegue para condiciones de operación visual. Fuente: [EASA, 2022].

De esta forma, tomando como referencia los criterios de diseño indicados en la Tabla 8.1, así como los datos conocidos correspondientes al diámetro de la FATO/SA,  $D_{SA}$ , equivalente a 28,5 m, se procede al diseño de la superficie de aproximación, cuyo proceso se divide en dos fases.

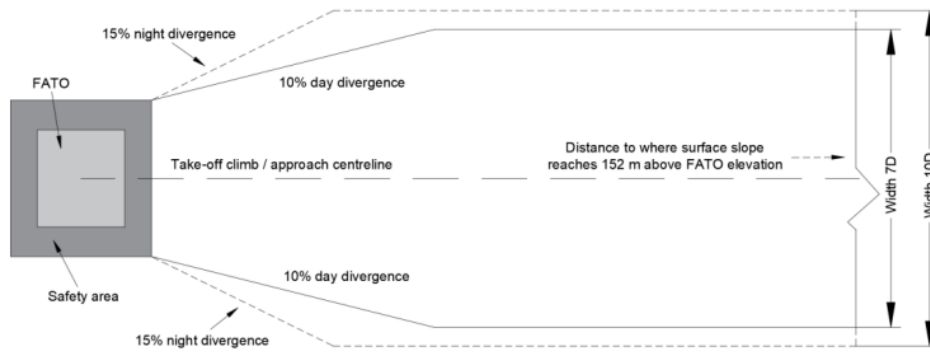


Figura 8.3: Anchos correspondientes a las superficies de aproximación y ascenso en el despegue. Fuente: [EASA, 2022].

De esta manera, las superficie de aproximación y elevación en el despegue serán representadas según la siguiente representación:

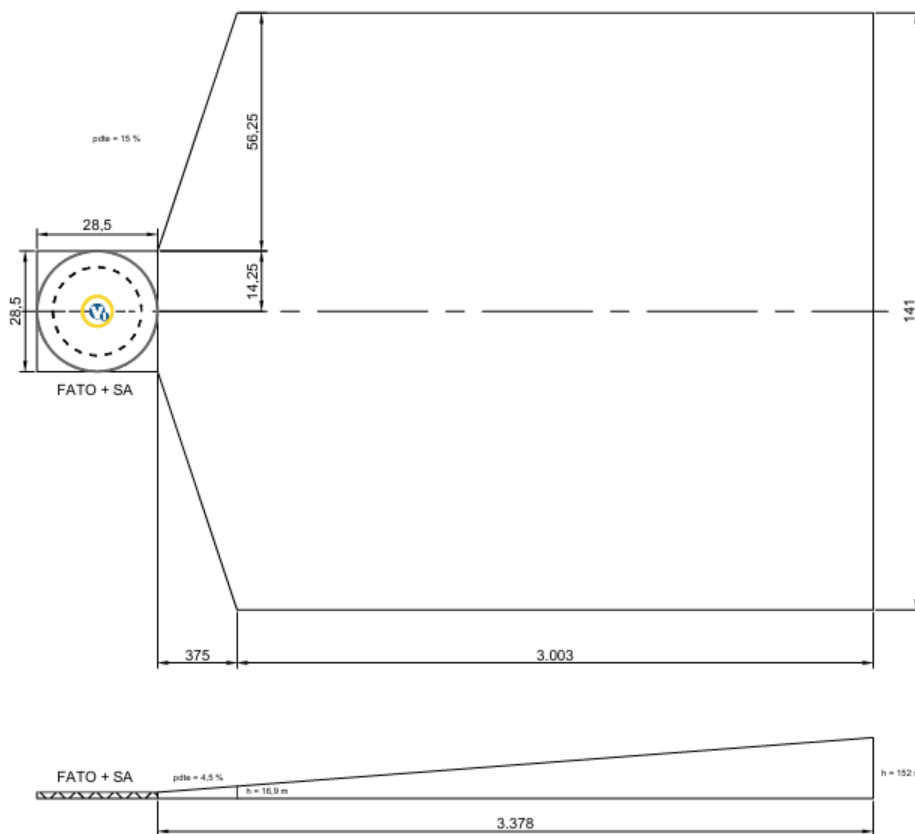


Figura 8.4: Superficie de aproximación del vertipuerto.

En primer lugar, para el caso de los límites laterales de la superficie se han tomado los valores correspondientes a la operación en condiciones nocturnas, las cuales presentan criterios más restrictivos, con un 15%. Esta divergencia debe extenderse hasta alcanzar un ancho del borde exterior correspondiente a 10 veces el parámetro  $D$ , es decir, un ancho total del borde exterior de 141,4 m, proyectando una longitud de 375 m para la sección 1 y 3.003 m para la sección 2. Esta longitud se ha calculado en base al diseño de alturas de la superficie, donde se aplicará una pendiente equivalente del 4,5% hasta alcanzar los 152 m de altura respecto a la altura de la FATO, alcanzando un valor total de 3.378 m. Esta distancia total es inferior a la

señalada en la Tabla 8.1, pero puede adecuarse debido a la condición *c*, que menciona que esta longitud total podrá ser inferior siempre y cuando se cumplan el diseño vertical de la superficie.

Parámetro	Sección 1	Sección 2
Divergencia (nocturna)	15 %	N/A
Ancho del borde interior	28,5 m	141,4 m
Longitud del plano	375 m	3.003 m
Ancho del borde exterior	141,4 m	141,4 m
Pendiente	4,5 %	4,5 %
Alto del borde exterior	16,88 m	152 m

Tabla 8.2: Superficie de aproximación y ascenso en despegue para condiciones NVFR.

### 8.1.5. Superficie de transición.

Debido a la condición de operación visual del vertipuerto, la normativa recomienda la implementación de una superficie de transición. Esta superficie tiene como objetivo proveer de un espacio protegido cuando las operaciones incluyen tránsito lateral, limitando la localización de los obstáculos como edificios u obstáculos.

Superficie de transición	Categoría A
Pendiente	45 %
Altura	45 m

Tabla 8.3: Dimensiones y pendientes para la superficie de transición en configuración visual.

De este modo, el límite inferior de la superficie de transición se extenderá a lo largo del área delimitada por la SA y el borde exterior correspondiente a la superficie de aproximación y elevación en el despegue, a partir del cual se extenderá verticalmente con una pendiente de 45°.

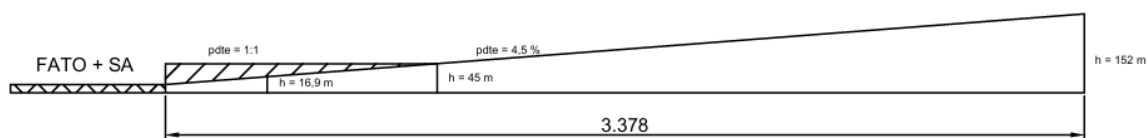


Figura 8.5: Superficie de transición del vertipuerto en perfil (metros).

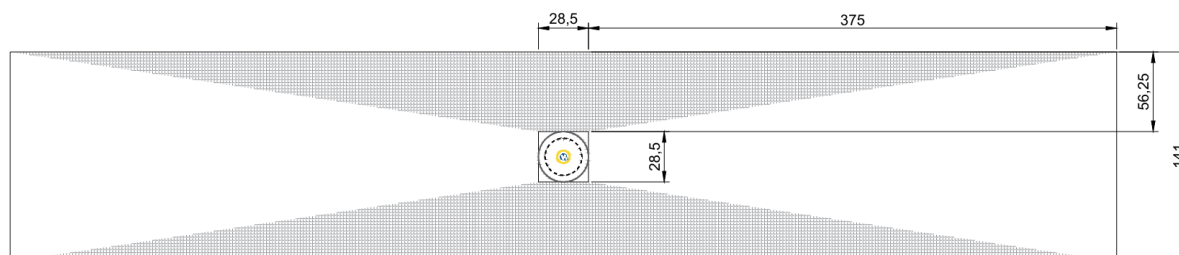


Figura 8.6: Superficie de transición del vertipuerto en planta (metros).

### 8.1.6. Modificación respecto al caso de aplicación.

Debido a la naturaleza del vertipuerto, descritas principalmente por su ubicación en entornos urbanos, la integración de las superficies limitadoras de obstáculos definidas en el entorno del emplazamiento seleccionado puede presentar complicaciones. Esto viene motivado por la proximidad de contrucciones y edificios en los alrededores del vertipuerto y la distancia de este mismo hasta ellos.

De esta forma, se ha planteado la integración de las superficies de aproximación y elevación en el despegue con el objetivo de determinar su viabilidad de acuerdo a la configuración del aeropuerto. Es necesario recordar que, como se ha mencionado previamente, el vertipuerto presentará una distribución de doble planta donde el lado aire vendrá dado en la parte superior de las intalaciones y, por tanto, permite la operación de las aeronaves desde un punto elevado equivalente a 14 m y no desde la superficie.

Según el emplamiento planteado, es posible observar las alturas máximas de los edificios circundantes, así como su distancia respecto al vertipuerto de acuerdo a la siguiente tabla:

Sección	Altura máxima	Diferencia Altura	Distancia V1	Distancia V2
Norte	40 m	28 m	23 m	163 m
Este	38 m	24 m	200 m	65 m
Sur	38 m	24 m	194 m	47 m
Oeste	37 m	23 m	29 m	212 m

Tabla 8.4: Alturas máximas y distancias del entorno respecto al vertipuerto.

Considerando las direcciones de operación establecidas para el vertipuerto con orientación  $W - E$ , las superficies limitadoras de obstáculos han sido integradas en ambas plataformas de despegue con el objetivo de observar su viabilidad respecto a los obstáculos definidos en el entorno urbano.

Como puede comprobarse, la pendiente de diseño requerida para el dimensionamiento de las superficies limitadoras de obstáculos no es lo suficientemente importante para permitir establecer un área de operación seguro en este tipo de configuración. Como consecuencia, la propia normativa plantea una modificación de las OLSs a través de la implementación de superficies de aproximación y ascenso en el despegue elevadas de tal forma que, los límites inferiores a las superficies de aproximación y ascenso en el despegue tengan como base la altura libre necesaria a adoptar para operar de forma segura sin interferir con los obstáculos definidos en el entorno.

En este caso, la superficie de transición tendrá como base el borde externo definido por la SA, y se extenderá verticalmente con una pendiente de  $45^\circ$  hasta alcanzar la altura libre necesaria. Será en esta altura a partir de la cual comenzarán las superficies de aproximación y elevación en el despegue. Como consecuencia, las dimensiones de ambas superficies variarán debido a la modificación del borde interno de las mismas, el cual describirá mayores dimensiones debido a la pendiente exterior definida por la superficie de transición hasta alcanzar la altura libre.

## 8.2. Volumen libre de obstáculos (OFVs).

La normativa establece el objetivo del volumen libre de obstáculos (OFV) en relación con la protección del espacio aéreo sobre los vertipuertos, con el propósito de facilitar la implementación de vertipuertos en áreas congestionadas y entornos poblados por obstáculos para aeronaves VTOL. Dado el carácter vertical de este elemento y la compleja adaptación de las superficies limitadoras de obstáculos al entorno urbano, el OFV se configura como una propuesta de diseño del espacio aéreo libre de obstrucciones que garantiza la seguridad y la eficiencia de las operaciones VTOL permitiendo una navegación segura en entornos urbanos densamente poblados.



El presente apartado detalla los requisitos y consideraciones para asegurar un OFV adecuado y adecuadamente protegido, fomentando así la integración exitosa de los vertipuertos en áreas urbanas y de alta densidad de tráfico aéreo.

Para su dimensionamiento, el apartado *PTS VPT-DSN.D.445* correspondiente a la normativa define los siguientes criterios de diseño en función de parámetros físicos y de operación de la aeronave, los cuales deberán ser recogidos en el AFM del eVTOL correspondiente.

Parámetro	Descripción	Mínimo/Máximo
$h_1$	Altura de hover baja	—
$h_2$	Altura de hover elevada	$\geq h_1$
$TO_{width}$	Ancho en $h_2$	$\leq 5D$
$TO_{front}$	Distancia frontal en $h_2$	$\leq 5D$
$TO_{back}$	Distancia trasera en $h_2$	$\leq 5D$
$FATO_{width}$	Ancho de la FATO	$\geq 1,5D$
$FATO_{front}$	Distancia frontal en la FATO	$\geq 0,75D$
$FATO_{back}$	Distancia trasera en la FATO	$\geq 0,75D$
$\theta_{app}$	Pendiente de superficie de aproximación	$\geq 4,5\%$
$\theta_{dep}$	Pendiente de superficie despegue	$\geq 4,5\%$

Tabla 8.5: Parámetros mínimos/máximos del procedimiento de despegue y aterrizaje vertical. Fuente: [EASA, 2022].

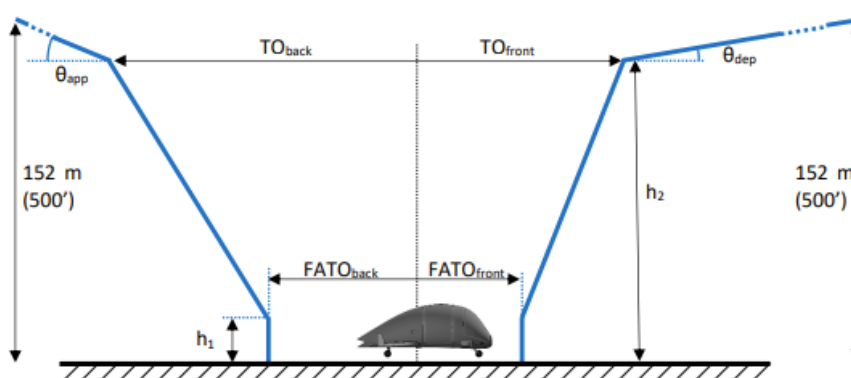


Figura 8.7: Criterio de diseño del volumen libre de obstáculos. Fuente: [EASA, 2022].

Para este concepto de definición del entorno libre de obstáculos, pueden calcularse independientemente las superficies de aproximación y de ascenso en despegue adoptando una dirección de operación del vertiport por cada operación, adoptar un planteamiento bidireccional donde ambas OLS pueden ser empleadas como superficie de aproximación o ascenso en el despegue o definir un volumen omnidireccional que permita operar independientemente de la orientación del aeropuerto. Este proyecto abordará la solución de volumen bidireccional, el cual puede ser dimensionado en base a los valores más restrictivos de los parámetros anterior y posterior correspondientes a los procedimientos de despegue y aterrizaje.

### 8.2.1. Volumen de referencia bidireccional.

El denominado como “*Volumen de Referencia Tipo 1*” proporciona un marco estándar para establecer un espacio tridimensional bien definido donde las operaciones de despegue y aterrizaje vertical puedan llevarse a cabo de manera segura y eficiente en las direcciones características del vertiport. Este volumen considera factores críticos, como la altura y el ancho necesarios para la aeronave eVTOL, así como los ángulos y distancias mínimas para garantizar un margen

adecuado de maniobra y evitar colisiones con obstáculos circundantes.

Los fabricantes de aeronaves eVTOL pueden optar por demostrar que cumplen con los parámetros y requisitos establecidos en esta tipología de volumen libre de obstáculos. Al hacerlo, se aseguran de que sus aeronaves están diseñadas y equipadas para operar de manera segura dentro de los límites predefinidos, lo que permite una mayor estandarización en el diseño de vertipuertos y facilita la integración de estas aeronaves en áreas urbanas densas y complejas.

Es importante destacar que la normativa también abre la posibilidad de desarrollar "Volúmenes de Referencia Adicionales" si la comunidad aeronáutica lo considera necesario. Estos volúmenes adicionales podrían adaptarse a diferentes configuraciones de vertipuertos o tipos específicos de aeronaves eVTOL, brindando flexibilidad para adaptarse a diversas condiciones operativas y facilitar la implementación de vertipuertos en diferentes entornos urbanos y regiones geográficas.

Siguiendo las recomendaciones dictadas por la normativa en el apartado *PTS VPT-DSN.D.485* y reflejados en la Tabla 8.6 como valores mínimos de diseño, se definen los parámetros correspondientes en base a ellos, así como las dimensiones de las superficies definidas en la Sección 10. Además, los valores de pendiente propuestos para los casos de aproximación y elevación en el despegue se mantendrán en su valor más restrictivo, siendo este de un 4,5 %.

Parámetro	Volumen de referencia	Valor
$h_1$	3 m	3 m
$h_2$	30,5 m	30,5 m
$TO_{width}$	3D	42,5 m
$TO_{front}$	2D	28,5 m
$TO_{back}$	2D	28,5 m
$FATO_{width}$	2D	28,5 m
$FATO_{front}$	1D	14,14 m
$FATO_{back}$	1D	14,14 m
$\theta_{app}$	$\geq 4,5\%$	4,5 %
$\theta_{dep}$	$\geq 4,5\%$	4,5 %

Tabla 8.6: Valores de referencia propuestos en la normativa para volumen bidireccional. Fuente: [EASA, 2022].

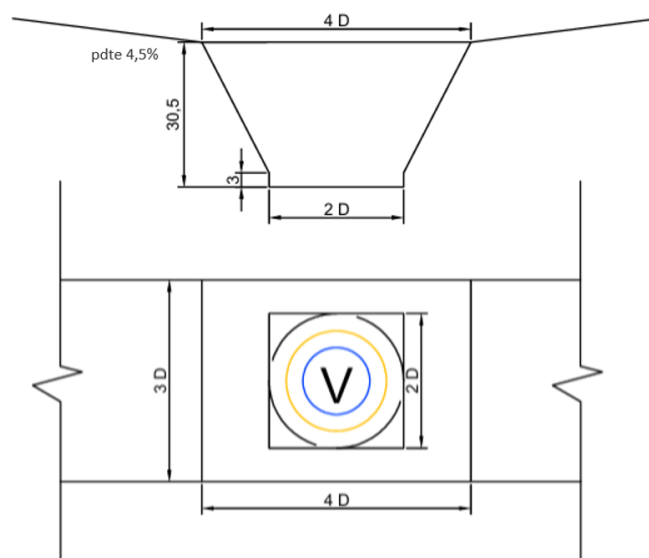


Figura 8.8: Volumen bidireccional del vertipuerto en metros.

De esta forma, se obtiene el volumen libre de obstáculos representado en la Figura 8.8 de acuerdo a la configuración bidireccional de operación planteada por el vertipuerto.



# Capítulo 9

## Ayudas visuales

### 9.1. Señalización y balizamiento.

#### 9.1.1. Indicador de dirección del viento.

La señal indicadora de viento en un vertipuerto tiene como propósito proporcionar a los pilotos una indicación visual clara y precisa sobre la dirección y velocidad del viento en la zona del FATO (área de toma de contacto y despegue) y TLOF (área de aterrizaje y despegue de helicópteros). Esto es fundamental para garantizar operaciones seguras y eficientes de las aeronaves VTOL.

Para su funcionamiento, la señal indicadora de viento se construye como un cono truncado hecho de tela ligera. De acuerdo a lo reflejado en la Tabla 9.1, el tamaño de este indicador varía según la altura del vertipuerto, con una longitud de 2,4 *m* para vertipuertos a nivel del suelo y 1,2 *m* para aquellos que se encuentran elevados.

	Vertipuerto en superficie	Vertipuertos elevados
Longitud	2,4 <i>m</i>	1,2 <i>m</i>
Diámetro (extremo mayor)	0,6 <i>m</i>	0,3 <i>m</i>
Diámetro (extremo menor)	0,3 <i>m</i>	0,15 <i>m</i>

Tabla 9.1: Dimensiones del indicador de viento según el tipo de vertipuerto. Fuente: [EASA, 2022].

Por lo tanto, el indicador de viento necesario para el vertipuerto planteado deberá constar de una longitud de 1,2 *m*, un diámetro de 0,3 *m* en su diámetro mayor y de 0,15 *m* para el extremo menor. Además, el indicador deberá encontrarse diseñado para ser visible desde una altura de al menos 200 metros sobre el vertipuerto.

El indicador se coloca en una posición estratégica, lejos de cualquier obstrucción que pueda alterar la precisión de la medición del viento. Si el FATO o TLOF está sujeto a corrientes de aire perturbadas, se pueden agregar indicadores de viento adicionales cerca del área para obtener una indicación más precisa del viento en la superficie.

El color de la señal se selecciona cuidadosamente para garantizar una buena visibilidad y comprensión desde la altura especificada. Preferentemente, se utiliza un solo color, como blanco o naranja. En caso de necesitar dos colores, se usarán preferiblemente combinaciones como naranja y blanco, rojo y blanco, o negro y blanco, dispuestos en bandas alternas para un mayor contraste.

En vertipuertos que operan durante la noche, la señal indicadora de viento debe estar iluminada para que los pilotos puedan recibir información vital sobre las condiciones del viento en todo momento. De esta manera, se facilita la toma de decisiones informadas durante el despegue y

aterrizaje, asegurando operaciones seguras y efectivas en el vertipuerto.

### 9.1.2. Señal de identificación del vertipuerto.

Para implementar esta señal, se debe colocar una letra “V” en color blanco dentro de un círculo azul. Tanto la “V” como el círculo azul deberán cumplir con dimensiones específicas reflejadas en la Figura 9.1. Si el vertipuerto está ubicado en un hospital, la señal se compone de una letra “V” en color rojo dentro de un círculo azul, ubicado en una cruz blanca hecha de cuadrados adyacentes a cada uno de los lados del cuadrado que contiene la “V”.

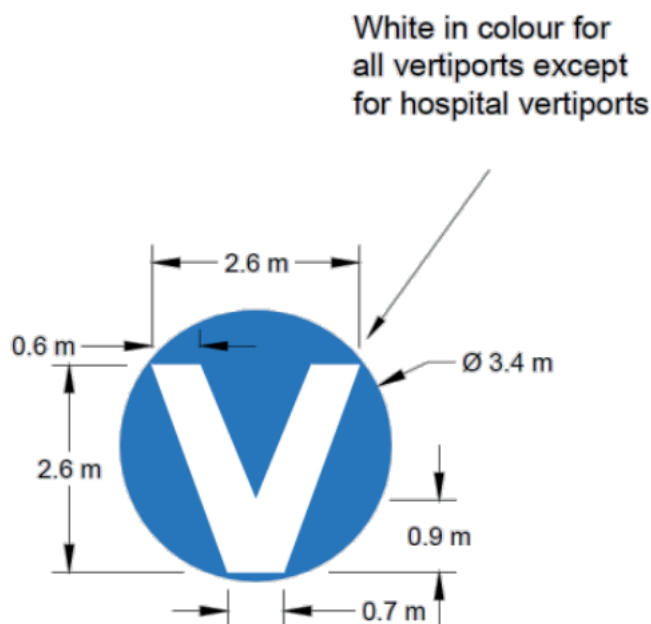


Figura 9.1: Señalización e identificación del vertipuerto.

La señal de identificación del vertipuerto debe colocarse en el centro del FATO o TLOF para la mayoría de los vertipuertos, pero puede ubicarse en el centro del TDPM si este se encuentra desplazado. En vertipuertos tipo pista, la señal debe estar dentro del FATO y mostrarse en ambos extremos de la FATO.

Además, la señal debe estar orientada de tal manera que su eje de simetría esté alineado con la dirección preferida de aproximación final, asegurando que sea legible desde esa dirección.

La señal de identificación del vertipuerto es esencial para guiar a los pilotos durante el enfoque y el despegue, permitiendo una operación segura y eficiente en el vertipuerto y garantizando la identificación correcta del mismo.

### 9.1.3. Señal de máxima masa permitida.

El objetivo de la señalización de masa máxima admisible es proporcionar la limitación de peso del vertipuerto, de modo que sea visible para el piloto desde la dirección preferida de aproximación final.

Para implementar esta señalización, se debe mostrar un número de dos o tres dígitos que represente la masa máxima permitida. El número debe expresarse en kilogramos y redondearse al centenar más cercano, seguido de la letra “t” para toneladas. Se debe utilizar un punto decimal marcado con un cuadrado de 30 cm para representar los decimales.

La señalización de masa máxima admisible debe colocarse dentro del TLOF o FATO y diseñarse de forma que sea legible desde la dirección preferida de aproximación final. Para FATOs que no son de tipo pista, el tamaño de los números y letras debe tener una altura mínima de 90 cm para valores de “D” entre 15 m y 30 m, y de 60 cm para valores de “D” menores a 15 m, con una reducción proporcional en el ancho y grosor de la señalización. Para FATOs tipo pista, se debe seguir el mismo criterio de tamaño y proporciones.

De acuerdo a las especificaciones técnicas mostradas por la aeronave eVTOL de referencia para el diseño de el vertipuerto planteado, la referencia de masa máxima admisible de la infraestructura correspondientes a un peso máximo de 3,175 kg se representará de la siguiente manera:

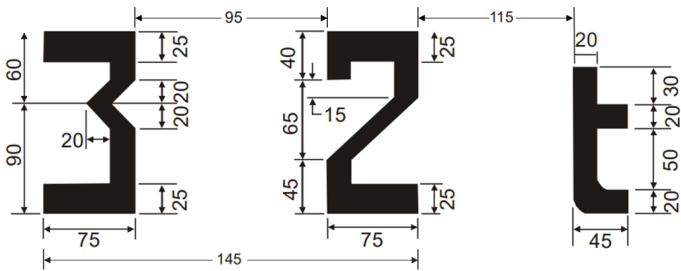


Figura 9.2: Señal de máxima masa permitida expresada en centímetros.

La señalización de masa máxima admisible resulta una referencia esencial para que los pilotos conozcan y cumplan con los límites de peso establecidos en el vertipuerto, garantizando la seguridad en las operaciones y evitando sobrecargas que puedan afectar el desempeño de los eVTOL.

**9.1.4. Señal de identificación de la FATO.**

Las señales de identificación de la FATO están diseñadas para distinguir entre diferentes FATOs cercanas en vertipuertos con dos o más FATOs. Estas señales no se utilizan en FATOs de tipo pista, donde la diferenciación se realiza mediante marcas de designación. Se deben proporcionar señales de identificación de FATO cuando sea necesario para la diferenciación.

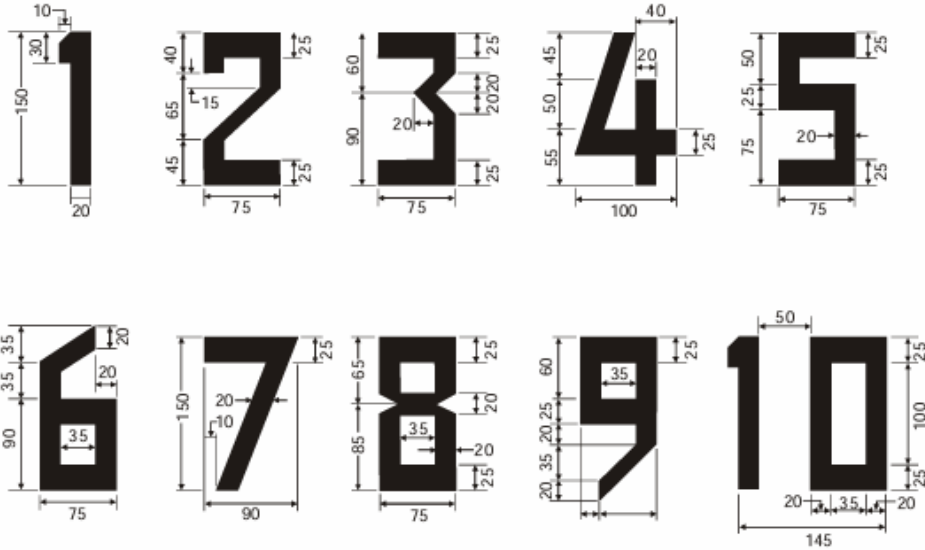


Figura 9.3: Dimensiones estipuladas para los identificadores de la FATO. Fuente: [EASA, 2022]

La señal de identificación debe ubicarse dentro de la FATO y ser legible desde la dirección preferida de aproximación final. Cada señal de identificación de la FATO debe consistir en un número ordinal, comenzando con 1 y terminando en el último de los FATOs numerados. Los números deben tener el tamaño y las proporciones especificadas en la Figura 9.3 y estar dentro de un círculo azul con un diámetro de 175 cm.

#### **9.1.5. Indicador del parámetro $D$ .**

La señal de valor " $D$ " del vertipuerto tiene como objetivo proporcionar al piloto la longitud máxima " $D$ " de la aeronave eVTOL más grande que puede ser acomodada en el vertipuerto. Este valor puede diferir en tamaño del FATO y el TLOF proporcionados de acuerdo con el *Capítulo C* de la normativa [EASA, 2022].

La señal de valor " $D$ " debe ubicarse dentro del TLOF o FATO y diseñarse de manera que sea legible desde la dirección preferida de aproximación final. Si hay más de una dirección de aproximación, se deben proporcionar señalizaciones adicionales de valor " $D$ " de manera que al menos una sea legible desde la dirección final de aproximación.

La señal de valor " $D$ " debe ser de color blanco y redondeada al metro más cercano con un redondeo hacia abajo para los valores decimales de 0,5 o mayores. El tamaño y proporciones de los números de la señalización deben seguir las mismas directrices que las seguidas en la 9.2, con una altura mínima de 60 cm para valores de " $D$ " menores a 15 m, con una reducción proporcional en el ancho y grosor de la señalización. De esta manera, el indicador del valor  $D$  para el vertipuerto planteado será igual a 14.

Es importante que la señal de valor " $D$ " esté claramente visible para los pilotos, ya que les proporciona información crucial sobre el espacio disponible en el vertipuerto y les permite tomar decisiones informadas sobre el tamaño máximo de la aeronave que pueden utilizar en ese lugar. Esto garantiza la seguridad en las operaciones y evita problemas relacionados con la falta de espacio para maniobrar y estacionar las aeronaves eVTOL.

#### **9.1.6. Señal de perímetro de la FATO.**

Las señales de perímetro de la FATO están diseñadas para indicar al piloto el área libre de obstáculos y en la cual pueden realizarse maniobras o procedimientos permitidos. Se deben proporcionar estas señales en un vertipuerto donde el perímetro de una FATO con superficie sólida no sea evidente. Las señales de perímetro de la FATO deben ubicarse en el borde de la FATO.

Para todas las FATOs, excepto las de tipo pista, el perímetro debe definirse con una línea discontinua de 30 cm de ancho, 1,5 m de largo y con un espacio de extremo a extremo de no menos de 1,5 m y no más de 2 m. Las señales de perímetro de la FATO y los marcadores empotrados deben ser de color blanco.

#### **9.1.7. Indicadores de perímetro de TLOF.**

Las marcas de perímetro de la TLOF deben mostrarse siempre en vertipuertos elevados, pero solo en vertipuertos a nivel de superficie si el perímetro no es evidente. El objetivo de una marca de perímetro de la TLOF es proporcionar al piloto una indicación de un área libre de obstáculos, que tiene capacidad de carga dinámica y en la cual, cuando se posiciona de acuerdo con el TDPM, se asegura el contención del tren de aterrizaje.

Una marca de perímetro de la TLOF debe mostrarse en una TLOF ubicada dentro de una FATO en un vertipuerto a nivel de superficie si el perímetro de la TLOF no es evidente y debe mostrarse en un vertipuerto que esté elevado.



La marca de perímetro de la TLOF debe ubicarse a lo largo del borde de la TLOF y consistir en una línea continua de color blanco con un ancho de al menos 30 cm.

### 9.1.8. Señal de punto de toma de contacto y posicionamiento.

La señal de punto de toma de contacto y posicionamiento (TDPM) tiene como objetivo proporcionar indicaciones visuales que permitan que una aeronave eVTOL se coloque en una posición específica de manera que, cuando el asiento del piloto esté sobre la señal, el tren de aterrizaje esté dentro del área de soporte de carga y todas las partes de la aeronave eVTOL estén libres de obstáculos con un margen de seguridad adecuado.

La TDPM debe ser proporcionada para permitir que una aeronave eVTOL aterrice o se posicione de manera precisa. Se deben utilizar dos tipos de TDPM según la dirección de aterrizaje/posicionamiento: un círculo de toma de contacto y posicionamiento (TDPC) cuando no hay limitación en la dirección o, cuando aplican limitaciones unidireccionales, una línea de referencia con una línea central asociada.

La ubicación de la TDPM debe tener su borde interior o circunferencia interior a una distancia de  $0,25 D$  del centro del área donde se posicionará la aeronave eVTOL.

Las características específicas de la TDPM son las siguientes:

El diámetro interior del TDPC debe ser  $0,5 D$  de la aeronave eVTOL más grande que el área tiene la intención de servir.

- La TDPM debe tener una línea con un ancho de al menos  $0,5 m$ .
- La longitud de la línea de referencia debe ser  $0,5 D$  de la aeronave eVTOL más grande que el área tiene la intención de servir.
- Cuando se utilizan otras señalizaciones en el TLOF, la TDPM tiene prioridad sobre ellas.

Tomando como referencia el caso de aplicación planteado, se obtienen los siguientes valores:

$$d_{TDPM} = 0,25 \cdot D = 0,25 \cdot 14,14 = 3,54m \approx \mathbf{3,6 m} \quad (9.1)$$

$$D_{TDPC} = 0,5 \cdot D = 0,5 \cdot 14,14 = 7,07m \approx \mathbf{7,1 m} \quad (9.2)$$

### 9.1.9. Marcas de puestos de estacionamiento para aeronaves VTOL

Las marcas de los puestos de estacionamiento para aeronaves VTOL indican al piloto un área libre de obstáculos y adecuada para maniobras y operaciones en tierra. Estas marcas incluyen identificación del puesto, limitaciones de masa y valor  $D$ , y guías para maniobrar y posicionar la aeronave.

Debe haber una marca de perímetro del puesto de estacionamiento para aeronaves VTOL cuando el diseño lo requiera. Las marcas de identificación del puesto se proporcionan donde sea necesario identificar puestos individuales.

Las líneas de alineación y las líneas de entrada/salida deben ubicarse para asegurar que la aeronave VTOL pueda maniobrar y posicionarse correctamente dentro del puesto.

Las marcas de perímetro del puesto deben ser líneas continuas amarillas de 15 cm de ancho. Las líneas de alineación y las líneas de entrada/salida también deben ser amarillas y de 15 cm de ancho, con flechas de dirección si es necesario. Las curvas deben tener radios adecuados para la aeronave más exigente. Las marcas de identificación del puesto deben ser de color contrastante para ser legibles fácilmente.

### 9.1.10. Señal de identificación del vertipuerto.

La señal de identificación del vertipuerto tiene como objetivo brindar al piloto un medio efectivo para identificar el vertipuerto desde todas las direcciones de aproximación. Es especialmente relevante en situaciones donde otras formas de identificación visual son limitadas o insuficientes.

Esta señal debe estar presente en aquellos vertipuertos donde no existan alternativas adecuadas de identificación visual. Su ubicación estratégica debe permitir que sea visible y legible desde todas las direcciones de aproximación de las aeronaves.

En cuanto a sus características, la señal de identificación del vertipuerto suele consistir en el nombre o designador alfanumérico específico del vertipuerto, tal como se utiliza en las comunicaciones por radio (R/T). Para garantizar su visibilidad durante la noche o en condiciones de baja visibilidad, se puede optar por iluminar la señal, ya sea mediante iluminación interna o externa.

En FATOs de tipo pista, los caracteres de la señal deben tener una altura mínima de 3 m, asegurando así su claridad y visibilidad. Para los demás FATOs, ya sean a nivel de superficie o elevados, la altura mínima de los caracteres debe ser de 1,5 m y 1,2 m, respectivamente. Además, se debe seleccionar un color de contraste, preferiblemente blanco, para asegurar que la señal destaque adecuadamente del fondo.

Estas especificaciones permiten que la señal de identificación del vertipuerto cumpla su función esencial de proporcionar a los pilotos una referencia clara y visible para identificar el vertipuerto desde cualquier dirección de aproximación.

En el caso de este proyecto, el vertipuerto se denominará *Vertipuerto Valencia-Juan Olivert Serra*, haciendo mención al pionero valenciano que realizó el primer vuelo motorizado en España en 1909, y cuya señal viene definida por las siglas *VJOS*, la cual deberá ser representada con una altura mínima de 1,2 metros.

## 9.2. Luces e iluminación del vertipuerto.

### 9.2.1. Faro del vertipuerto.

El faro del vertipuerto tiene como objetivo proporcionar una guía visual de largo alcance cuando sea necesario, cuando no se encuentre disponible mediante otros medios visuales, o cuando la identificación del vertipuerto se dificulte debido a luces circundantes.

La instalación del faro del vertipuerto es aplicable en los siguientes casos:

- Cuando se considere necesaria una guía visual de largo alcance y no se pueda proporcionar mediante otros medios visuales.
- Cuando la identificación del vertipuerto sea difícil debido a luces circundantes.

La ubicación preferente para colocar el faro del vertipuerto es en el vertipuerto mismo o en sus proximidades, idealmente en una posición elevada para evitar deslumbrar a los pilotos a corta distancia. En casos donde el faro pueda deslumbrar a los pilotos en la etapa final del enfoque y aterrizaje, especialmente durante la noche, se puede considerar la opción de apagarlo durante esta fase.

El faro del vertipuerto debe emitir series repetidas de destellos de color blanco, con una duración corta y espaciados de manera uniforme, siguiendo el formato específico mostrado en la normativa. La luz del faro debe ser visible desde todos los ángulos de azimut. Para evitar deslumbramientos, especialmente durante el enfoque y aterrizaje final, se pueden proporcionar controles de brillo (con ajustes de 10 % y 3 %) o protecciones adicionales.

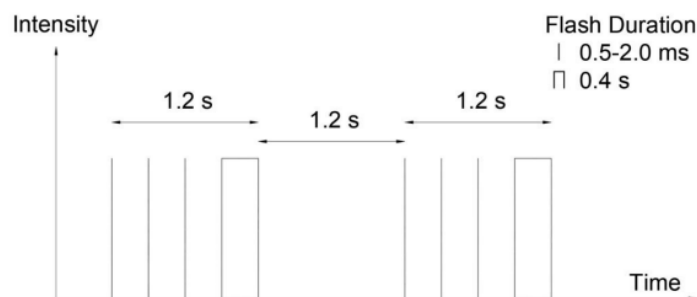


Figura 9.4: Características de destellos para el faro del vertipuerto. Fuente: [EASA, 2022].

Elevation	
10°	250 cd*
7°	750 cd*
4°	1 700 cd*
2 1/2°	2 500 cd*
1 1/2°	2 500 cd*
0°	1 700 cd*
-180° Azimuth	+180°
(white light)	

\* Effective intensity

Illustration 1 — Vertiport beacon

Figura 9.5: Diagrama de isocandela para el faro del vertipuerto. Fuente: [EASA, 2022].

La distribución efectiva de la intensidad lumínica de cada destello debe cumplir con las especificaciones ilustradas en la normativa, asegurando así un funcionamiento adecuado del faro del vertipuerto en situaciones de baja visibilidad o condiciones de poca luz.

### 9.2.2. Sistema de iluminación de aproximación.

El sistema de luces de aproximación tiene como objetivo proporcionar una indicación de la dirección de aproximación preferida para mejorar la información de la velocidad de cierre para los pilotos durante la noche.

Este sistema se aplica cuando se requiere indicar una dirección preferida de aproximación. Debe estar ubicado en una línea recta a lo largo de la dirección preferida de aproximación.

El sistema de luces de aproximación debe constar de una fila de tres luces espaciadas uniformemente a intervalos de 30 m y una barra transversal de 18 m de longitud a una distancia de 90 m del perímetro del FATO. Las luces que forman la barra transversal deben estar ubicadas en una línea horizontal lo más recta posible, perpendicular y bisectada por la línea de las luces del centro, espaciadas a intervalos de 4,5 m. Si se necesita hacer más visible el curso de aproximación final, se pueden añadir luces adicionales espaciadas uniformemente a intervalos de 30 m más allá de la barra transversal. Estas luces pueden ser fijas o intermitentes secuencialmente, según el entorno.

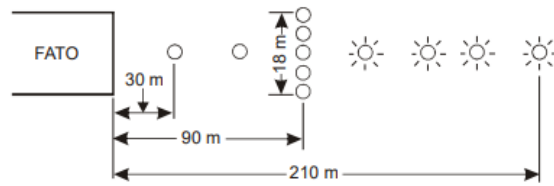


Figura 9.6: Sistema de luces de aproximación. Fuente: [EASA, 2022].

Las luces deben ser blancas, omnidireccionales y fijas, a excepción de las luces más allá de la barra transversal, que pueden ser fijas o intermitentes secuencialmente. Las luces intermitentes deben tener una frecuencia de un destello por segundo y su distribución de luz debe seguir el patrón mostrado en la normativa, comenzando desde la luz más externa y avanzando hacia la barra transversal.

Para ajustar la intensidad lumínica según las condiciones prevaecientes, el sistema debe contar con un control de brillo adecuado, que incluya los siguientes ajustes de intensidad: luces fijas al 100 %, 30 % y 10 %; y luces intermitentes al 100 %, 10 % y 3 %.

### 9.2.3. Sistema de iluminación para la alineación de la trayectoria de vuelo.

El sistema de iluminación para la alineación de trayectoria de vuelo tiene como objetivo proporcionar al piloto una indicación visual durante la noche de las direcciones disponibles para para efectuar las trayectorias de aproximación o salidas, pudiendo combinarse con el sistema de marcado de alineación de trayectoria de vuelo, según lo descrito en la normativa.

Este sistema debe estar ubicado en una línea recta a lo largo de la dirección o direcciones definidas por las trayectorias de aproximación o salidas, ya sea en una o más de las superficies TLOF, FATO, SA o cualquier otra superficie adecuada en las inmediaciones del FATO, TLOF o SA.

Este sistema debe consistir en una fila de tres o más luces espaciadas uniformemente con una distancia mínima total de 6 m. Los intervalos entre las luces no deben ser inferiores a 1,5 m ni superar los 3 m. Si el espacio lo permite, se deben instalar cinco luces.

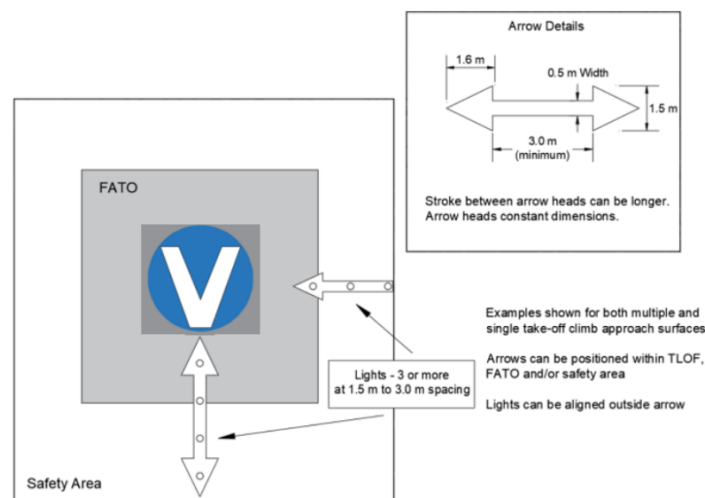


Figura 9.7: Iluminación y señalización para la alineación de trayectoria de vuelo. Fuente: [EASA, 2022].

Las luces deben ser blancas, omnidireccionales y fijas, distribuidas según el patrón mostrado

en la normativa. Además, el sistema debe permitir ajustar la intensidad lumínica para adaptarse a las condiciones prevalecientes y equilibrar la iluminación de alineación de trayectoria de vuelo con otras luces del vertipuerto y la iluminación general que pueda estar presente alrededor del vertipuerto.

#### 9.2.4. Sistema de guía de alineación visual.

El sistema de guía de alineación visual en un vertipuerto tiene como objetivo proporcionar al piloto señales visuales claras para mantener una trayectoria específica hacia el área de aterrizaje y evitar obstáculos durante la aproximación final, especialmente en operaciones nocturnas. Su ubicación estratégica en el borde contrario al viento del FATO y su alineación con la dirección preferida de enfoque proporciona tres sectores discretos: “desviación a la derecha”, “en trayectoria” y “desviación a la izquierda”, que guían al piloto para mantener el rumbo correcto hacia el FATO.

El sistema debe ser único y fácilmente distinguible de otras ayudas visuales. Se requiere control de intensidad para ajustar la luminosidad y evitar deslumbramientos. También se deben cumplir requisitos específicos sobre la distancia entre las luces y el ángulo de ajuste para garantizar la visibilidad desde diferentes ángulos de visión y mantener una separación segura de obstáculos.

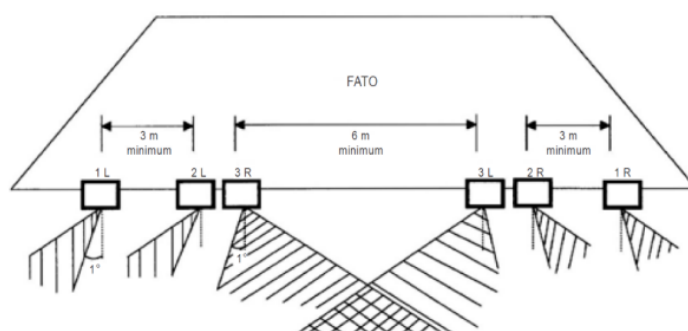


Figura 9.8: Sistema de iluminación para la alineación visual. Fuente: [EASA, 2022].

En conclusión, el sistema de guía de alineación visual es una herramienta valiosa para asegurar una aproximación segura y precisa hacia el vertipuerto, proporcionando señales visuales discretas y claras para orientar al piloto durante la aproximación final, especialmente en situaciones con baja visibilidad o en entornos con limitaciones visuales.

#### 9.2.5. Indicador visual de pendiente de aproximación.

El indicador visual de pendiente de aproximación en un vertipuerto tiene como objetivo proporcionar señales visuales claras y discretas, dentro de una elevación y ángulo de visión específicos, para ayudar al piloto a mantener la pendiente de aproximación deseada hacia una posición específica dentro del FATO. Se instala en vertipuerto donde existen condiciones que requieren una pendiente particular, especialmente en operaciones nocturnas o cuando el entorno del vertipuerto proporciona pocas señales visuales en la superficie, además de aquellos que requieren una aproximación estabilizada.

El sistema incluye indicadores como el Precision Approach Path Indicator (PAPI), el Abbreviated Precision Approach Path Indicator (APAPI) o el Helicopter Approach Path Indicator (HAPI). El HAPI, concretamente, está diseñado para proporcionar una aproximación visual deseada y detección de desviaciones verticales y se coloca en el lado contrario al viento del FATO o en el eje de enfoque preferido. La señal incluye cuatro sectores discretos distribuidos en: “por

encima de la pendiente”, “en la pendiente, “ligeramente por debajo de la pendiente” y “por debajo de la pendiente”. La ubicación y ajuste del ángulo del HAPI se realizan de manera precisa para guiar al piloto y evitar deslumbramientos.

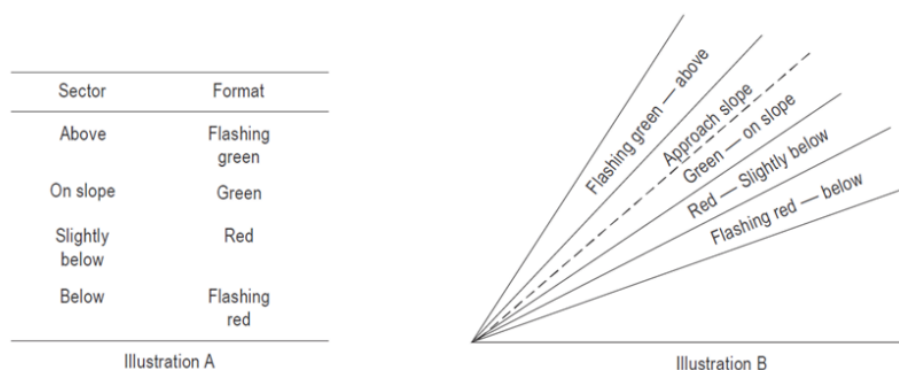


Figura 9.9: Sistema de iluminación HAPI. Fuente: [EASA, 2022].

El sistema de guía de alineación visual tiene como objetivo proporcionar señales visuales claras y discretas para ayudar al piloto a mantener la trayectoria de aproximación deseada hacia el vertiportuero y evitar obstáculos durante la aproximación final. Se instala en vertiportuero que requieren una trayectoria específica debido a procedimientos de despeje de obstáculos, control de tráfico o limitaciones visuales en el entorno del vertiportuero. El sistema consiste en luces dispuestas en una línea recta a lo largo de la dirección preferida de enfoque, con tres sectores discretos: “desviación a la derecha”, “en la trayectoria” y “desviación a la izquierda”. Se ajusta para cumplir con las condiciones de visibilidad y evitar deslumbramientos al piloto.

El sistema de iluminación de alineación de trayectoria de vuelo en un vertiportuero tiene como objetivo proporcionar señales visuales que indiquen las direcciones de aproximación y/o partida disponibles. Se instala para indicar las direcciones de aproximación y/o salidas en vertiportueros donde se requiere guía visual para los pilotos, especialmente durante operaciones nocturnas o en entornos con limitadas señales visuales en la superficie. El sistema incluye una fila de tres o más luces dispuestas uniformemente, proporcionando una distancia total mínima de 6 m entre ellas. Las luces son de color blanco y se ajustan para proporcionar una intensidad adecuada y evitar deslumbramientos. El sistema también permite el ajuste del ángulo de iluminación para indicar las direcciones disponibles de aproximación y/o partida.

### 9.2.6. Sistema de iluminación FATO.

La iluminación de la FATO (Área Final de Toma y Despegue) en un vertiportuero tiene como objetivo proporcionar al piloto una indicación clara de la forma, ubicación y extensión de la FATO durante las operaciones nocturnas.

En cuanto a su aplicabilidad, se requiere proporcionar luces de la FATO en vertiportueros con superficie sólida destinados a proporcionar operaciones en horario nocturno. Sin embargo, se pueden omitir estas luces si la FATO y el TLOF (Área de Aterrizaje y Despegue) son casi coincidentes o si la extensión de la FATO es evidente sin la necesidad de luces específicas.

La ubicación de las luces correspondientes a la FATO debe ser aplicada a lo largo de los bordes de la FATO. Para áreas en forma de cuadrado o rectángulo, las luces deben estar espaciadas uniformemente a intervalos de no más de 50 m, con un mínimo de cuatro luces en cada lado, incluida una luz en cada esquina. Para áreas con otras formas, incluidas las circulares, las luces deben estar espaciadas uniformemente a intervalos de no más de 5 m, con un mínimo de diez luces.

En cuanto a las características, las luces de la FATO deben ser luces fijas omnidireccionales que muestren luz blanca o verde. Si se desea variar la intensidad de las luces, se pueden utilizar luces con luz blanca o verde variable y su altura de las luces no debe exceder los 25 *cm* y deben estar insertadas en la superficie si alguna de ellas pudiese poner en peligro las operaciones de las aeronaves VTOL.

### 9.2.7. Sistema de iluminación de la TLOF.

El sistema de iluminación para el Área de Aterrizaje y Despegue Final (TLOF) en un vertipuerto tiene como objetivo proporcionar una iluminación adecuada para la TLOF y sus elementos requeridos. En el caso de estar ubicada en un vertipuerto elevado, busca facilitar la visibilidad de la TLOF desde una distancia definida y proporcionar referencias de forma para establecer un ángulo de aproximación apropiado.

En vertipuertos destinados a ser utilizados durante la noche, la instalación un sistema de iluminación para la TLOF es requerido por la normativa. Las luces perimetrales de la TLOF deben ubicarse a lo largo del borde del área designada o a una distancia de 1,5 metros del borde, y su espaciamiento debe ser uniforme. Para vertipuertos elevados, las luces perimetrales deben tener un espaciamiento de no más de 3 metros, mientras que para vertipuertos al nivel del suelo, este espaciamiento debe ser de no más de 5 metros.

Las luces perimetrales de la TLOF deben ser fijas y omnidireccionales, las cuales se caracterizan por la proyección de luz verde. Además, se permite el uso de alumbrados, arrays de luces de fuente puntual segmentada (ASPSL) o paneles luminiscentes (LPs) para identificar la TLOF cuando las luces perimetrales no son viables. En vertipuertos elevados, las referencias de textura superficial en la TLOF son esenciales para el posicionamiento de aeronaves VTOL durante la fase final, y pueden lograrse mediante varias formas de iluminación combinadas con luces perimetrales.

### 9.2.8. Iluminación de la marca de identificación del vertipuerto.

El objetivo del sistema de iluminación de la marca de identificación del vertipuerto es proporcionar al piloto una indicación clara de la presencia del vertipuerto, su forma, el uso probable y las direcciones preferidas de aproximación. Cuando se proporciona, la marca de identificación del vertipuerto con forma de letra 'V' debe estar delimitada con iluminación en sus bordes.

La letra "V" debe estar delineada con iluminación de bordes de color verde, compuesta por subsecciones de entre 80 *mm* y 100 *mm* de ancho, mientras que el alojamiento mecánico debe ser de color blanco. Si una subsección está compuesta por elementos de iluminación individuales (por ejemplo, LEDs), deberán tener un rendimiento nominalmente idéntico y estar espaciados equidistantemente para facilitar su identificación. El espacio mínimo entre las áreas iluminadas dichos elementos debe ser de 3 *cm* y el máximo de 10 *cm*.

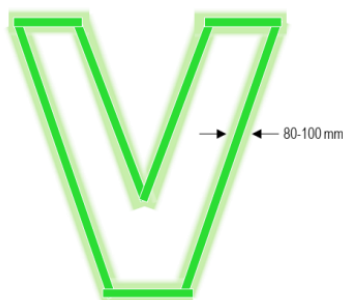


Figura 9.10: Iluminación correspondiente a la marca "V". Fuente: [EASA, 2022].

En general, el sistema de iluminación de la marca de identificación del vertipuerto debe ser integrado en la superficie circundante para evitar la acumulación de residuos o pequeñas fracciones. El cumplimiento de estas especificaciones garantiza que los pilotos tengan una clara identificación del vertipuerto, su forma y las direcciones preferidas de aproximación, contribuyendo así a la seguridad y eficiencia en las operaciones de las aeronaves VTOL en el vertipuerto.

#### **9.2.9. Iluminación del área de estacionamiento.**

El objetivo del sistema de iluminación del estacionamiento en un vertipuerto es proporcionar una iluminación adecuada de la superficie del estacionamiento y las marcas asociadas, con el objetivo de facilitar las maniobras y la posición de las aeronaves VTOL, permitiendo realizar de manera segura las operaciones esenciales alrededor de la aeronave VTOL.

La iluminación del estacionamiento de aeronaves VTOL debe ser provista con luces de inundación en la plataforma o mediante iluminación ambiental. Las luces de inundación en la plataforma deben estar ubicadas estratégicamente para proporcionar una iluminación adecuada, evitando deslumbramientos tanto para el piloto de una aeronave VTOL en vuelo como en tierra, así como para el personal en la plataforma. Además, estas luces deben estar dispuestas de tal manera que la plataforma reciba luz desde dos o más direcciones para minimizar las sombras.

La distribución espectral de las luces de inundación en la plataforma debe ser adecuada para identificar correctamente los colores utilizados para marcar la superficie y los obstáculos. La iluminancia horizontal y vertical debe ser suficiente para garantizar que los pilotos puedan discernir las señales visuales necesarias para las maniobras y posicionamiento requeridos, y que las operaciones esenciales alrededor de la aeronave VTOL se puedan realizar de manera expedita sin poner en peligro al personal o equipo. Todo esto, en cumplimiento con las regulaciones y estándares aplicables a los vertipuertos.

#### **9.2.10. Iluminación de las rutas de taxi.**

El objetivo del sistema de iluminación de las rutas de taxi en un vertipuerto es proporcionar una iluminación adecuada de las marcas o señalizaciones utilizadas en dichas rutas. Las especificaciones para las luces de línea central de taxiway y las luces de borde de taxiway, descritas en las regulaciones CS-ADR-DSN, son igualmente aplicables a las rutas de taxi destinadas al taxi terrestre de aeronaves VTOL.

Las rutas de taxi para aeronaves VTOL deben ser iluminadas de la misma manera que las rutas de taxi destinadas al uso de aviones convencionales, de acuerdo con las normativas establecidas en CS-ADR-DSN. Esto implica proporcionar una iluminación adecuada de las marcas o señalizaciones presentes en las rutas, asegurando que sean claramente visibles para los pilotos y el personal de tierra.

Cuando las rutas de taxi no se encuentren en la misma ubicación que las rutas de taxi convencionales, las marcas utilizadas para las rutas de taxi aéreo deberán ser iluminadas de acuerdo con las mismas especificaciones que se utilizan para las rutas de taxi convencionales. En el caso de marcadores utilizados en rutas de taxi aéreo, estos deberán ser iluminados internamente o tener características retroreflectantes para garantizar su visibilidad y seguridad durante las operaciones. Todo esto debe cumplir con los estándares y regulaciones aplicables a los vertipuertos.



# Capítulo 10

## Dimensionamiento de la infraestructura

En este capítulo se procederá a definir el dimensionamiento final de la infraestructura del vertipuerto. Tras haber realizado un análisis exhaustivo de las áreas operativas y las superficies limitadoras de obstáculos, se busca establecer una configuración definitiva que garantice la funcionalidad y seguridad del vertipuerto, cumpliendo con las normativas y estándares vigentes.

El dimensionamiento de la infraestructura comprende la disposición de los elementos esenciales del vertipuerto, tales como las áreas de toma de contacto y elevación inicial, las áreas de aproximación final y despegue, las áreas de seguridad operacional y los puestos de estacionamiento (stands) para dar servicio a las necesidades de demanda planteadas previamente a lo largo de este proyecto. Asimismo, se incluirán las calles de rodaje necesarias para conectar estos componentes, asegurando un flujo operativo eficiente y seguro para las aeronaves.

Además de la configuración operativa del vertipuerto, se procederá con la planificación de la distribución del edificio. Esta sección del capítulo abordará el diseño y la disposición de las zonas de llegadas y salidas, garantizando que se cumplan todos los requisitos funcionales y de comodidad para los pasajeros. La integración adecuada de estas áreas es fundamental para proporcionar una experiencia fluida y segura, facilitando el movimiento de pasajeros y optimizando la eficiencia operativa del vertipuerto.

El objetivo de este capítulo es, mediante un análisis detallado, establecer un diseño de vertipuerto que no solo cumpla con los estándares técnicos y de seguridad, sino que también optimice el uso del espacio disponible y mejore la experiencia de todos los usuarios del vertipuerto. Se busca, en definitiva, crear una infraestructura que facilite la operación eficiente de las aeronaves eVTOL y proporcione un entorno seguro y cómodo para los pasajeros.

### 10.1. Configuración del vertipuerto.

#### 10.1.1. Requisitos de operación

La configuración óptima del vertipuerto es un proceso crítico y complejo que requiere un análisis exhaustivo de diversos factores. Para determinar el número necesario de TLOFs que cubran eficientemente la demanda proyectada de operaciones de aeronaves VTOL, es imprescindible considerar una serie de datos clave obtenidos previamente.

En primer lugar, se ha realizado un estudio detallado sobre la capacidad por eVTOL, que incluye el tiempo de rodadura, despegue, handling y aproximación de cada tipo de aeronave VTOL. Este análisis ha permitido establecer el tiempo promedio que cada aeronave pasa en el TLOF durante diferentes etapas de su operación, lo que a su vez influye en la frecuencia de uso de los TLOFs y, por lo tanto, en el número requerido.

Además, se ha tomado en consideración el patrón de demanda horaria para el vertipuerto, analizando las horas del día con mayor afluencia de operaciones y las horas de menor actividad. Esto es esencial para determinar la capacidad máxima requerida en momentos de alta demanda y garantizar que el vertipuerto pueda operar de manera eficiente durante los períodos de mayor concurrencia.

De esta manera, se ha partido de la capacidad de la aeronave de referencia, la cual supone una configuración de 7 asientos, siendo 6 de ellos destinados a pasajeros comerciales. Por otro lado, se ha tomado la distribución horaria fijada en la Figura 5.13 como vector característico de la demanda diaria del vertipuerto, atendiendo a los criterios de estimación de la demanda establecidos para la demanda pico (PHP) obtenida en secciones anteriores.

En lo referente a los tiempos, se ha realizado una distribución conceptual de los diferentes movimientos que caracterizan la operación de un eVTOL en tierra y aire en las inmediaciones del vertipuerto. Como consecuencia, se han tomado los siguientes tiempos de operación:

Operación	Tiempo estimado
$t_{App}$	5 min
$t_{taxi-in}$	2 min
$t_{turnover}$	37 min
$t_{taxi-out}$	2 min
$t_{TO}$	5 min

Tabla 10.1: Tiempos estimados según operación.

Respecto a los tiempos reflejados en la Tabla 10.1, se ha tomado como referencia un tiempo de recarga de 37 min, asociando este periodo de tiempo al caso más restrictivo de operación, donde la aeronave debería realizar una carga completa del vehículo, de acuerdo a los últimos avances en las tecnologías de recarga a cargo de empresas especializadas [BETA, 2023], cuyos tiempos de operación se estiman vayan disminuyendo. Además, al tratarse de una duración elevada, las tareas de handling podrían realizarse paralelamente, sin condicionar en mayor medida el tiempo de la aeronave en plataforma.

Otro aspecto relevante es el número de vuelos por hora, lo que indica la cantidad de aeronaves que podrían estar operando simultáneamente en el espacio aéreo cercano al vertipuerto. Este dato influye directamente en la frecuencia de aterrizajes y despegues, y por ende, en la necesidad de contar con un número adecuado de TLOFs disponibles para atender la demanda.

Una vez definidos todos estos datos, se estima un tiempo máximo de vuelo correspondiente al trayecto más largo fijado de acuerdo a las rutas de largo alcance planteadas con el objetivo de conocer el caso más restrictivo de operación. Además, se ha estimado una eficiencia de la infraestructura del 85%. Con ello, y suponiendo una ocupación media de aeronave de 2 pasajeros como hipótesis, se obtiene que:

$$AHP_{lleg} = AHP_{sal} = \left\lceil \frac{PHP}{2 \times \text{Ocupación media de aeronave}} \right\rceil = \left\lceil \frac{7}{2 \times 2} \right\rceil = 2 \text{ aeronaves / hora} \quad (10.1)$$

$$n_{TLOF} = \frac{AHP_{lleg} \cdot (t_{App} + t_{taxi-in} + t_{turnover}) + AHP_{sal} \cdot (t_{taxi-out} + t_{TO})}{60 \cdot \eta_{operation}} \quad (10.2)$$

$$n_{TLOF} = \begin{cases} n_{TLOF} + 1 & \text{si } n_{TLOF} = 1 \\ n_{TLOF} & \text{si } n_{TLOF} > 1 \end{cases} \quad (10.3)$$

Considerando la necesidad de un TLOF extra por seguridad en caso de que solo sea necesario uno como configuración de operación:

$$n_{TLOF} = \frac{2 \cdot (5 + 2 + 37) + 2 \cdot (2 + 5)}{60 \cdot 0,85} = \frac{2 \cdot 44 + 2 \cdot 7}{51} = \frac{88 + 14}{51} \approx 2 \quad (10.4)$$

Por lo tanto, se requieren 2 TLOFs.

Por otro lado, una vez definido el número de TLOFs que caracterizan el vertipuerto, es necesario determinar el número de estacionamientos. En este caso, serán los tiempos de handling y de recarga, principalmente, los que condicionen el dimensionamiento de los puestos para albergar la flota correspondiente de la infraestructura. Además, se considera un stand extra debido a posibles problemas que puedan dejar alguno fuera de servicio. En este caso:

$$n_{stands} = \frac{AHP_{total} \cdot t_{turnover}}{60 \cdot \eta_{operation}} + 1 \quad (10.5)$$

$$AHP_{total} = 4 \quad (10.6)$$

$$n_{stands} = \frac{4 \cdot 37}{60 \cdot 0,85} + 1 = \frac{148}{51} + 1 \approx 3 + 1 = 4 \quad (10.7)$$

Por lo tanto, se requieren 4 stands.

El estudio también ha tenido en cuenta la previsión climática y los factores meteorológicos que podrían afectar la operación de las aeronaves. Las condiciones climáticas, como vientos fuertes, lluvias intensas o neblina, pueden influir en la frecuencia de uso de los TLOFs y, en consecuencia, en su capacidad requerida.

Adicionalmente, la configuración del vertipuerto se ha evaluado en función de la ubicación y el espacio disponible. Para aprovechar al máximo el terreno y garantizar una distribución eficiente de las TLOFs y puestos de estacionamiento, se han llevado a cabo estudios de diseño y planificación urbana, los cuales se reflejan en el Capítulo 10.

### 10.1.2. Secuencia de operación y coeficientes de ocupación

Para la operación UAM, un vertipuerto se construirá en un espacio limitado en una zona céntrica o se integrará con infraestructura existente. Por lo tanto, es necesario considerar una distribución que pueda operar la mayor cantidad de aeronaves posibles en un espacio reducido. En este sentido, se compararon las tres configuraciones revisadas en la sección anterior bajo las mismas condiciones para evaluar la capacidad.

El procedimiento operativo de las aeronaves en el vertipuerto se muestra en la Figura 10.1. En este contexto, se ha definido una secuencia de operación clara para las aeronaves VTOL en el vertipuerto, de acuerdo a los tiempos planteados en el Punto :

1. **Llegada y aproximación ( $t_{App}$ ):** La aeronave se aproxima al vertipuerto y aterriza en el TLOF. Este proceso toma aproximadamente 5 minutos.
2. **Taxi-in ( $t_{taxi-in}$ ):** Una vez en tierra, la aeronave se desplaza desde el TLOF hasta el stand asignado. Este tiempo se ha estimado en 2 minutos, considerando una distancia constante.
3. **Turnaround ( $t_{turnover}$ ):** La aeronave realiza las operaciones de recarga y handling en el stand. Este proceso toma aproximadamente 37 minutos.
4. **Taxi-out ( $t_{taxi-out}$ ):** La aeronave se desplaza desde el stand de vuelta al TLOF para preparar el despegue. Este tiempo también se ha estimado en 2 minutos.

5. **Despegue** ( $t_{TO}$ ): La aeronave despegue del TLOF, lo cual toma aproximadamente 5 minutos.

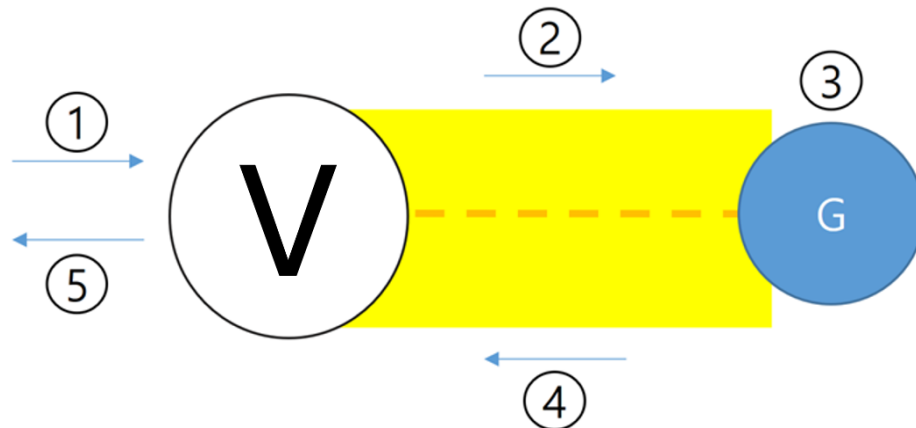


Figura 10.1: Proceso de operación de un vertipuerto.

Para la operación segura del vertipuerto, se establece que solamente puede haber una aeronave en el nodo donde el TLOF y el stand están conectados. Por ejemplo, cuando una aeronave está realizando la fase de aproximación (1) a un vertipuerto con un TLOF, ninguna aeronave puede comenzar con la fase de despegue (5).

Una vez definida la secuencia, se plantea un análisis secuencial de tiempos y ocupación de las superficies TLOF y puestos de estacionamiento con el objetivo de conocer posibles tiempos de espera surgidos de la operativa real del vertipuerto. Para ello, se ha cogido una configuración tal que a cada TLOF le corresponden 4 puestos de estacionamiento. Siguiendo las distancias operativas reflejadas en el *AC 150/5370-10H*, el análisis de capacidad de las diferentes superficies ha sido planteado para una TLOF asumiendo que el vertipuerto se encuentra al 50 % de capacidad para el momento  $t = 0$ , es decir, stands 1 y 3 ocupados, y stands 2 y 4 con aeronave estacionada. Para acomodar el número máximo de aeronaves, se ha priorizado las maniobras de llegada sobre las salidas en el TLOF.



Figura 10.2: Proceso de operación de un vertipuerto.

Finalmente, el análisis de capacidad se realizó considerando estos tiempos y se obtuvo un diagrama de Gantt que representa la secuencia de operaciones y el tiempo de ocupación del TLOF. El resultado de este análisis se refleja en los siguientes coeficientes de ocupación:

<b>Número de stands</b>	4
<b>Utilización del TLOF</b>	96,8 %
<b>Utilización del stand</b>	83,6 %
<b>Espera</b>	13,3 %

Tabla 10.2: Resultados del análisis de capacidad del vertipuerto con un TLOF y cuatro stands.

## 10.2. Edificación y equipos aeroportuarios.

### 10.2.1. Elección del Nivel de Servicio

Para el diseño y dimensionamiento de la terminal de pasajeros del vertipuerto, se ha optado por aplicar los niveles de servicio (LoS) definidos en el *Airport Development Reference Manual*. La Tabla 10.3 presenta los diferentes niveles de servicio disponibles.

Nivel	Descripción
A	Un nivel de servicio excelente. Condiciones de flujo libre, sin demoras y excelentes niveles de confort.
B	Alto nivel de servicio. Condiciones de flujo estable, muy pocas demoras y altos niveles de confort.
C	Buen nivel de servicio. Condiciones de flujo estable, demoras aceptables y buenos niveles de confort.
D	Nivel adecuado de servicio. Condiciones de flujo inestable, demoras aceptables por cortos periodos de tiempo y niveles adecuados de confort.
E	Nivel inadecuado de servicio. Condiciones de flujo inestable, demoras inaceptables y niveles inadecuados de confort.
F	Nivel inaceptable de servicio. Condiciones de flujos cruzados, fallas en el sistema y demoras inaceptables; nivel inaceptable de confort.

Tabla 10.3: Tabla de Niveles de Servicio (LoS). Fuente: [IATA, 2004].

En el presente proyecto, se ha decidido dimensionar las instalaciones del vertipuerto para ofrecer un **Nivel de Servicio A**. Este nivel de servicio garantiza condiciones de flujo libre, sin demoras, y un confort excelente para los pasajeros.

### 10.2.2. Parámetros para el Nivel de Servicio A

Para alcanzar el Nivel de Servicio A, se han considerado los siguientes parámetros:

- **Espacio por Pasajero:** 2,6 m<sup>2</sup>.
- **Velocidad de Flujo:** 1,3 m/s.
- **Tiempo de Procesamiento en Check-in:** 120 segundos por pasajero.
- **Tiempo de Procesamiento en Control de Seguridad:** 60 segundos por pasajero.
- **Porcentaje de Pasajeros Sentados en espera de embarque:** 80 %.
- **Porcentaje de Pasajeros de Pie en espera de embarque:** 20 %.

### 10.2.3. Check-in

El dimensionamiento de los mostradores de check-in necesarios en la terminal del vertipuerto basa su procedimiento en el cálculo de la demanda máxima en un periodo de 30 minutos, la cual se obtiene utilizando los parámetros de Pasajeros en Hora Pico (PHP) y factores de ajuste.

La fórmula utilizada para calcular la demanda máxima de 30 minutos en el check-in es la siguiente:

$$X = \text{PHP} \times F1 \times F2 \quad (10.8)$$

Para ello, no solo se han dimensionado las superficies en base a la demanda actual, sino también para cubrir las necesidades del vertipuerto ante demandas futuras. De esta forma, se han tomado como datos de diseño los datos de demanda estimada definidos en el Punto 5.5, correspondientes a la aceptación del 25 % de los viajeros de la demanda relativa calculada, tal que:

- **X:** Demanda de 30 minutos en el check-in.
- **PHP:** Pasajeros en Hora Pico = 34.
- **F1:** Porcentaje de PHP en los 30 minutos pico = 30 % (de la tabla 1 del manual).
- **F2:** Demanda adicional generada por los vuelos antes y después del pico = 1.26 (de la tabla 2 del manual para 60 %).

Aplicando estos valores, se obtiene la demanda máxima de 30 minutos en el check-in:

$$\text{Demanda de 30 minutos en el check-in} = 34 \times 0,30 \times 1,26 = 12,852 \approx 13 \text{ pasajeros} \quad (10.9)$$

A continuación, se determina el resultado intermedio S, que se estima en aproximadamente 5 según el gráfico proporcionado en el manual para una demanda de 30 minutos de 13 pasajeros:

$$S = 5 \quad (10.10)$$

El número de mostradores de check-in de clase económica se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\#CIY = S \times \left( \frac{PT_{ci}}{150} \right) \quad (10.11)$$

Donde PT<sub>ci</sub> es el tiempo promedio de procesamiento en el check-in en segundos, que se asume como 150 segundos:

$$\#CIY = 5 \times \left( \frac{150}{150} \right) = 5 \quad (10.12)$$

Finalmente, para incluir los mostradores dedicados a pasajeros de clase business, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\#CIJ = \#CIY \times 0,20 \quad (10.13)$$

$$\#CI = \#CIY + \#CIJ \quad (10.14)$$

$$\#CIJ = 5 \times 0,20 = 1 \quad (10.15)$$

$$\#CI = 5 + 1 = 6 \quad (10.16)$$

Por lo tanto, se requieren **6 mostradores de check-in** para cumplir con el Nivel de Servicio A.

Adicionalmente, es necesario determinar el espacio requerido para la zona de check-in. Según las directrices del manual, el espacio por pasajero en el área de check-in para un Nivel de Servicio

A es de 2.6 m<sup>2</sup> [IATA, 2004], considerando que cada mostrador de check-in puede atender hasta 10 pasajeros por hora en condiciones óptimas.

$$\text{Espacio requerido} = \text{Número de mostradores} \times \text{Espacio por pasajero} \times \text{Capacidad por hora} \quad (10.17)$$

Asumiendo que cada mostrador atiende 10 pasajeros por hora, y dado que se requiere espacio para los 6 mostradores de check-in:

$$\text{Espacio requerido} = 6 \times 2,6 \times 10 = 156 \text{ m}^2 \quad (10.18)$$

Este espacio incluye el área necesaria para la circulación y el confort de los pasajeros en el área de check-in, así como el espacio destinado a las filas y la infraestructura asociada a los mostradores de check-in sin causar congestión.

Espacio del área (m <sup>2</sup> )	Número de mostradores
156	6

Tabla 10.4: Características del área de check-in.

#### 10.2.4. Control de Pasaportes de Salida

Para dimensionar el área de control de pasaportes de salida, se debe calcular la demanda máxima de 10 minutos en el check-in. La fórmula utilizada es:

$$\text{Peak 10-minute demand} = \#CIY \times \left( \frac{600}{PT_{ci}} \right) \times (1 + \%J) \quad (10.19)$$

Donde:

- #CIY: Número de mostradores de check-in de clase económica, que se ha determinado previamente como 5.
- PT<sub>ci</sub>: Tiempo promedio de procesamiento en el check-in, asumido como 150 segundos.
- %J: Porcentaje de pasajeros de clase business, asumido como 20 %.

Aplicando estos valores, se obtiene:

$$\text{Peak 10-minute demand} = 5 \times \left( \frac{600}{150} \right) \times (1 + 0,20) \quad (10.20)$$

$$\text{Peak 10-minute demand} = 5 \times 4 \times 1,20 = 24 \text{ pasajeros} \quad (10.21)$$

El siguiente paso es calcular el número de mostradores de control de pasaportes necesarios. Esto se determina con la siguiente fórmula:

$$\#PCD = \text{Peak 10-minute demand} \times \left( \frac{PT_{pcd}}{600} \right) \quad (10.22)$$

Donde el PT<sub>pcd</sub> es el tiempo promedio de procesamiento en el control de pasaportes en segundos, asumido como 15 segundos.

Aplicando estos valores:

$$\#PCD = 24 \times \left( \frac{15}{600} \right) \quad (10.23)$$

$$\#PCD = 24 \times 0,025 = 0,6 \approx 1 \text{ mostrador} \quad (10.24)$$

Para determinar el número máximo de pasajeros en cola, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Max \#Q} = (\text{MQT} \times \#PCD \times 60) / \text{PTpcd} \quad (10.25)$$

Donde el MQT es el tiempo máximo de cola en minutos, que se asume como 5 minutos.

Aplicando estos valores:

$$\text{Max \#Q} = (5 \times 1 \times 60) / 15 \quad (10.26)$$

$$\text{Max \#Q} = 20 \text{ pasajeros} \quad (10.27)$$

Para una configuración de cola única, el espacio requerido se calcula como:

$$L = \text{Max \#Q} \times \text{LOS Standard} / W \quad (10.28)$$

Donde:

- LOS Standard es el espacio requerido por pasajero, que es 1.4 m<sup>2</sup> para un Nivel de Servicio A.
- W es el ancho de la fila, que se asume como 1.2 m.

Aplicando estos valores:

$$L = (20 \times 1,4) / 1,2 = 23,33 \text{ m} \quad (10.29)$$

Debido a que el cálculo inicial sugiere un solo mostrador, se añade un mostrador adicional para prevenir posibles problemas o bloqueos en uno de los mostradores, asegurando así un flujo continuo y eficiente de pasajeros.

Espacio del área (m <sup>2</sup> )	Número de mostradores
23,33	2

Tabla 10.5: Características del área de control de pasaportes de salida.

### 10.2.5. Control de Seguridad

Para dimensionar el área de control de seguridad, es necesario calcular la demanda máxima de 10 minutos en los mostradores de check-in y luego determinar el número de mostradores de seguridad necesarios.

Para calcular la demanda máxima de 10 minutos en el check-in, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Peak 10-minute demand} = \#CIY \times \left( \frac{600}{\text{PTci}} \right) \times (1 + \%J) \quad (10.30)$$

Donde:

- #CIY: Número de mostradores de check-in de clase económica, que se ha determinado previamente como 5.
- PTci: Tiempo promedio de procesamiento en el check-in, asumido como 150 segundos.
- %J: Porcentaje de pasajeros de clase business, asumido como 20%.



Aplicando estos valores:

$$\text{Peak 10-minute demand} = 5 \times \left( \frac{600}{150} \right) \times (1 + 0,20) \quad (10.31)$$

$$\text{Peak 10-minute demand} = 5 \times 4 \times 1,20 = 24 \text{ pasajeros} \quad (10.32)$$

El número de mostradores de seguridad se determina utilizando la siguiente fórmula:

$$\#SC = \text{Peak 10-minute demand} \times \left( \frac{PTsc}{600} \right) \quad (10.33)$$

Donde:

- PTsc: Tiempo promedio de procesamiento en el control de seguridad en segundos, asumido como 12 segundos.

Aplicando estos valores:

$$\#SC = 24 \times \left( \frac{12}{600} \right) \quad (10.34)$$

$$\#SC = 24 \times 0,02 = 0,48 \approx 1 \text{ mostrador} \quad (10.35)$$

El número máximo de pasajeros en cola se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Max \#Q} = (\text{MQT} \times \#SC \times 60) / PTsc \quad (10.36)$$

Donde:

- MQT: Tiempo máximo de cola en minutos, asumido como 3 minutos.

Aplicando estos valores:

$$\text{Max \#Q} = (3 \times 1 \times 60) / 12 \quad (10.37)$$

$$\text{Max \#Q} = 15 \text{ pasajeros} \quad (10.38)$$

Debido a que el número máximo de pasajeros en cola es de 15, lo cual excede la capacidad de un solo mostrador para 30 pasajeros, se hace necesario añadir un mostrador adicional para asegurar que el tiempo de espera sea razonable y se mantenga dentro de los límites del Nivel de Servicio A. Por lo tanto, se deben considerar 2 mostradores de control de seguridad.

Finalmente, se debe determinar el espacio requerido para el área de control de seguridad. Asumiendo que cada mostrador de seguridad requiere un espacio mínimo de 2.6 m<sup>2</sup> por pasajero para un Nivel de Servicio A y que se necesita espacio adicional para la circulación y las filas:

$$\text{Espacio requerido} = \text{Número de mostradores} \times \text{Espacio por pasajero} \times \text{Número máximo de pasajeros} \quad (10.39)$$

Aplicando estos valores:

$$\text{Espacio requerido} = 2 \times 2,6 \times 15 = 78 \text{ m}^2 \quad (10.40)$$

Espacio del área (m <sup>2</sup> )	Número de mostradores
78	2

Tabla 10.6: Características del área de control de seguridad.

### 10.2.6. Zona de Embarque

El dimensionamiento de la zona de embarque se basa en la capacidad de las aeronaves, el porcentaje de pasajeros sentados y el porcentaje de pasajeros de pie. Según las directrices del manual, la fórmula utilizada para calcular el espacio necesario en la zona de embarque es:

$$\text{Zona embarque (m}^2\text{)} = (0,8 \times \text{Pax aeronave} \times 0,8 \times 1,7) + (0,8 \times \text{Pax aeronave} \times 0,2 \times 1,2) \quad (10.41)$$

Donde:

- 80 % de la capacidad de la aeronave es el factor utilizado para dimensionar la zona de embarque.
- 80 % de los pasajeros se asumen sentados - 1,7 m<sup>2</sup> / pasajero.
- 20 % de los pasajeros se asumen de pie - 1,2 m<sup>2</sup> / pasajero.

Dado que cada aeronave de referencia para este vertipuerto tiene una capacidad máxima de 6 pasajeros, aplicamos estos valores a la fórmula del espacio necesario en la zona de embarque:

$$\text{Zona de embarque (m}^2\text{)} = (0,8 \times 6 \times 0,8 \times 1,7) + (0,8 \times 6 \times 0,2 \times 1,2) \quad (10.42)$$

Realizando los cálculos:

$$\text{Zona de embarque (m}^2\text{)} = (0,8 \times 6 \times 0,8 \times 1,7) + (0,8 \times 6 \times 0,2 \times 1,2) \quad (10.43)$$

$$\text{Zona de embarque (m}^2\text{)} = 6,528 + 1,152 = 7,68 \text{ m}^2 \quad (10.44)$$

Sin embargo, para el Nivel de Servicio A, se recomienda un mayor espacio debido a la menor ocupación máxima permitida. La tabla correspondiente de la normativa indica que para un Nivel de Servicio A, la tasa de ocupación máxima es del 40 %. Por lo tanto, para asegurar la comodidad y evitar la congestión, se ajusta el espacio requerido de acuerdo a esta tasa de ocupación.

$$\text{Espacio ajustado} = \frac{\text{Zona de embarque}}{0,40} \quad (10.45)$$

Aplicando este ajuste:

$$\text{Espacio ajustado} = \frac{7,68}{0,40} = 19,2 \text{ m}^2 \quad (10.46)$$

Este espacio calculado es para cada uno de los puestos de estacionamiento. Dado que el vertipuerto tiene un total de 8 posiciones de estacionamiento, el espacio total necesario para la zona de embarque es:

$$\text{Espacio total ajustado} = 19,2 \text{ m}^2 \times 8 = 153,6 \text{ m}^2 \quad (10.47)$$

Así, para cumplir con el Nivel de Servicio A, la zona de embarque debe tener un espacio mínimo de 153.6 m<sup>2</sup> para las 8 posiciones de estacionamiento.

Espacio del área (m <sup>2</sup> )	Número de posiciones
153,6	8

Tabla 10.7: Características del área de zona de embarque.

### 10.2.7. Control de Pasaportes de Llegada

El dimensionamiento del área de control de pasaportes de llegada se basa en el cálculo de la demanda máxima de pasajeros en un periodo de 10 minutos y el tiempo promedio de procesamiento en el control de pasaportes. La fórmula utilizada para calcular el número de mostradores de control de pasaportes necesarios es:

$$\#PCD = S \times \left( \frac{PT_{pca}}{20} \right) \quad (10.48)$$

Donde:

- #PCD: Número de mostradores de control de pasaportes.
- S: Resultado intermedio obtenido del gráfico, en este caso 3.
- PT<sub>pca</sub>: Tiempo promedio de procesamiento en el control de pasaportes en segundos, asumido como 30 segundos.

Aplicando estos valores, se obtiene:

$$\#PCD = 3 \times \left( \frac{30}{20} \right) = 3 \times 1,5 = 4,5 \approx 5 \text{ mostradores} \quad (10.49)$$

Para determinar el número máximo de pasajeros en cola, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Max } \#Q = (\text{MQT} \times \#PCD \times 60) / PT_{pca} \quad (10.50)$$

Donde el MQT es el tiempo máximo de cola en minutos, que se asume como 10 minutos.

Aplicando estos valores:

$$\text{Max } \#Q = (10 \times 5 \times 60) / 30 = 100 \text{ pasajeros} \quad (10.51)$$

Para una configuración de cola única, el espacio requerido se calcula como:

$$L = \text{Max } \#Q \times \text{LOS Standard/W} \quad (10.52)$$

### Single (Bank) Queue

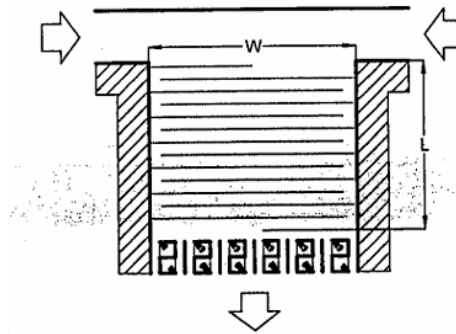


Figura 10.3: Referencia del manual frente a configuración de cola única. Fuente: [IATA, 2004].

Donde:

- LOS Standard es el espacio requerido por pasajero, que es 1,4 m<sup>2</sup> para un Nivel de Servicio A.
- W es el ancho de la fila, que se asume como 1,2 m.

Aplicando estos valores:

$$L = (100 \times 1,4) / 1,2 = 116,67 \text{ m} \quad (10.53)$$

Aplicando estos valores:

$$L = (100 \times 0,9) / 5 = 18 \text{ m} \quad (10.54)$$

Configuración	Espacio del área (m <sup>2</sup> )	Número de mostradores
Cola única	116,67	5

Tabla 10.8: Características del área de control de pasaportes de llegada.

### 10.2.8. Hall de Llegadas

El hall de llegadas es un área crucial donde los pasajeros se reúnen con sus acompañantes y recogen su equipaje de mano. El dimensionamiento del hall de llegadas se basa en la fórmula proporcionada por el manual para determinar el espacio requerido, considerando tanto a los pasajeros como a sus acompañantes.

La fórmula para calcular el área del hall de llegadas es:

$$A = SPP \times \left( \frac{AOP \times PHP}{60} \right) + SPP \times \left( \frac{AOV \times PHP \times VPP}{60} \right) \quad (10.55)$$

Donde:

- A: Área del hall de llegadas en metros cuadrados.
- SPP: Espacio requerido por persona (m<sup>2</sup>). Para un Nivel de Servicio A, se asume 2,6 m<sup>2</sup> por ocupante.
- AOP: Tiempo promedio de ocupación por pasajero en minutos (se asume 5 minutos).

- PHP: Pasajeros en Hora Pico (34 pasajeros).
- AOV: Tiempo promedio de ocupación por visitante en minutos (se asume 30 minutos).
- VPP: Número de visitantes por pasajero (se asume 0,7).

Aplicando estos valores:

$$A = 2,6 \times \left( \frac{5 \times 34}{60} \right) + 2,6 \times \left( \frac{30 \times 34 \times 0,7}{60} \right) \quad (10.56)$$

Realizando los cálculos:

$$A = 2,6 \times \left( \frac{170}{60} \right) + 2,6 \times \left( \frac{714}{60} \right) \quad (10.57)$$

$$A = 2,6 \times 2,833 + 2,6 \times 11,9 \quad (10.58)$$

$$A = 7,366 + 30,94 = 38,306 \text{ m}^2 \quad (10.59)$$

Sin embargo, para el Nivel de Servicio A, se recomienda un mayor espacio debido a la menor ocupación máxima permitida. Se ajusta el espacio requerido de acuerdo a una tasa de ocupación máxima del 40 %.

$$\text{Espacio ajustado} = \frac{38,306}{0,40} = 95,765 \text{ m}^2 \quad (10.60)$$

Para asegurar un servicio eficiente y evitar congestiones, se redondea el área a 96 m<sup>2</sup>.

<b>Espacio del área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Número de pasajeros (PHP)</b>
96	34

Tabla 10.9: Características del área del hall de llegadas.

Adicionalmente, se realizará un hall similar para las salidas, con las mismas características y dimensiones basado en el mismo razonamiento.

### 10.2.9. Superficie de la terminal.

En este documento se ha realizado el dimensionamiento de diversas instalaciones necesarias para el correcto funcionamiento del vertipuerto, asegurando un Nivel de Servicio A según las directrices del manual de referencia. Las instalaciones calculadas incluyen el área de check-in, el control de pasaportes de salida, el control de seguridad, la sala de espera de embarque y los halls de llegadas y salidas. Cada una de estas áreas ha sido dimensionada cuidadosamente para atender la demanda de pasajeros en hora pico (PHP) y hora de diseño (PHD), considerando factores como la ocupación media por aeronave y los tiempos promedio de procesamiento. A continuación, se presenta una tabla resumen de los espacios requeridos para cada una de estas instalaciones, junto con el espacio total necesario para la terminal.

Área	Espacio del área (m <sup>2</sup> )
Check-in	157
Control de Pasaportes de Salida	24
Control de Seguridad	79
Sala de Espera de Embarque	154
Hall de Llegadas	96
Control de Pasaportes de Llegada	140
Hall de Salidas	96
<b>Total</b>	<b>746</b>

Tabla 10.10: Resumen de los espacios requeridos en la terminal

Categoría	Espacio total (m <sup>2</sup> )
Llegadas	236
Salidas	510

Tabla 10.11: Resumen de los espacios destinados a llegadas y salidas

### 10.2.10. Hangares

Para albergar las 8 aeronaves en hangares, se opta por construir dos hangares más pequeños, cada uno con capacidad para 4 aeronaves. Esta configuración permite una mejor organización y acceso para el mantenimiento y las maniobras.

Cada aeronave tiene una dimensión de diseño  $D = 14,14$  metros. Para permitir maniobras y mantenimiento, se estima añadir un 25 % adicional a cada dimensión, resultando en un espacio necesario por aeronave de aproximadamente 18 metros.

Para los dos hangares, se dispondrán las aeronaves en cada hangar en una configuración de 2 filas y 2 columnas. Esto implica que el largo y el ancho total de cada hangar será de 36 metros. Añadiendo un espacio adicional de 2 metros en todos los lados para maniobras internas y acceso, se obtienen las dimensiones finales de los hangares:

$$\text{Largo con maniobras} = 36 \text{ m} + 2 \times 2 \text{ m} = 40 \text{ m} \quad (10.61)$$

$$\text{Ancho con maniobras} = 36 \text{ m} + 2 \times 2 \text{ m} = 40 \text{ m} \quad (10.62)$$

La estimación del área total de cada hangar es:

$$\text{Área total de un hangar} = 40 \text{ m} \times 40 \text{ m} = 1600 \text{ m}^2 \quad (10.63)$$

Por lo tanto, para los dos hangares, la estimación del área total es:

$$\text{Área total para dos hangares} = 2 \times 1600 \text{ m}^2 = 3200 \text{ m}^2 \quad (10.64)$$

En resumen, la construcción de dos hangares, cada uno con capacidad para 4 aeronaves, proporciona la flexibilidad necesaria para el mantenimiento y las maniobras. La distribución de las aeronaves en una configuración de 2 filas y 2 columnas en cada hangar, junto con el espacio adicional para maniobras, garantiza un acceso eficiente y seguro a todas las aeronaves.

- Dimensiones de cada hangar: 40 m x 40 m
- Área total de un hangar: 1600 m<sup>2</sup>

- Área total para dos hangares: 3200 m<sup>2</sup>

### 10.3. Estimación de Potencia

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

Sin embargo, esto conlleva importantes restricciones que actualmente limitan el alcance de la Movilidad Aérea Urbana mediante estos medios. Por un lado, la baja energía específica de las baterías de iones de litio en comparación con los combustibles fósiles tradicionales aumenta considerablemente el peso de la aeronave y limita el rango y la autonomía disponibles. Por otro lado, si se desea garantizar un alto volumen de operaciones en el vertipuerto, especialmente en las horas punta del día, se requiere una sofisticada instalación eléctrica para la recarga de baterías, que incluya transformadores AC/DC en cada punto de recarga.

Para garantizar un funcionamiento eficiente del vertipuerto, es esencial una planificación adecuada de las operaciones. El tiempo de carga de las baterías está limitado por las características de la instalación eléctrica y los avances tecnológicos en la recarga de baterías. La carga rápida de baterías optimiza la eficiencia del vertipuerto, pero requiere altos niveles de potencia y un avanzado sistema de gestión y recarga de baterías.

La recarga en nuestro vertipuerto se realizará en el puesto de estacionamiento mediante puntos de carga adaptados a condiciones de carga rápida. Aunque la carga podría realizarse externamente con posterior intercambio de baterías, hemos optado por la recarga directa en los stands. Esto permite un diseño más flexible y adaptable a futuras tecnologías de baterías, que se espera mejoren significativamente en los próximos años.

Para estimar la potencia necesaria para la recarga de las aeronaves en el servicio de taxi aéreo, se han considerado los siguientes parámetros pertenecientes a la aeronave de diseño, suponiendo un tiempo de carga adecuado y deseable para una operación eficiente del vertipuerto:

- Energía específica: 38 kWh
- Tiempo de carga: 37 minutos
- Peso de las baterías: 240 kg

La potencia necesaria se puede calcular utilizando la fórmula:

$$P = \frac{E}{t} \quad (10.65)$$

Donde:

- $E$  es la energía (38 kWh)
- $t$  es el tiempo de carga en horas

Sustituyendo los valores:

$$P = \frac{38 \text{ kWh}}{\frac{37}{60} \text{ h}} = 38 \text{ kWh} \cdot \frac{60}{37} \approx 61,62 \text{ kW} \quad (10.66)$$

De esta manera, se necesitarán aproximadamente 61.62 kW de potencia por cada punto de recarga para permitir la carga rápida de baterías dentro de los límites establecidos. Para un vertipuerto con 8 puestos de estacionamiento, se deberá considerar un factor de simultaneidad no inferior a 1.5 veces la potencia nominal de cada puesto para asegurar que el vertipuerto pueda operar eficientemente incluso durante los picos de demanda.

Por lo tanto, la potencia total requerida para la recarga de aeronaves será:

$$P_{total} = 61,62 \text{ kW} \cdot 8 \cdot 1,5 \approx 739,44 \text{ kW} = 0,74 \text{ MW} \quad (10.67)$$

Además de contar con una instalación adecuada con cargadores de alta potencia en cada puesto de estacionamiento, es crucial garantizar una ubicación con fiabilidad eléctrica para soportar estas demandas. Se deben prever avances en la tecnología de carga rápida, con cargadores que ofrezcan picos de potencia mayores para aeronaves eVTOL, similares a los cargadores avanzados para vehículos eléctricos actuales.

Por lo tanto, es fundamental que el vertipuerto esté equipado con una infraestructura eléctrica robusta y flexible que pueda adaptarse a las necesidades operativas y tecnológicas futuras del sector UAM.

## 10.4. Instalaciones y Equipos de Respuesta a Emergencias.

Para asegurar la seguridad de las operaciones en el vertipuerto, se deben implementar diversas instalaciones y equipos de respuesta a emergencias, conforme a la normativa EASA y OACI. En esta sección, se detallarán los cálculos necesarios y los requisitos para los sistemas de extinción de incendios y otros equipos de emergencia necesarios.

### 10.4.1. Cálculo del Área Crítica Práctica

Para calcular el área crítica práctica para la aplicación del medio de extinción principal en un flujo sólido, utilizamos la siguiente fórmula proporcionada por la normativa:

$$\text{Área crítica práctica} = \text{Longitud del fuselaje} \times (\text{Anchura del fuselaje} + W_1) \quad (10.68)$$

Donde  $W_1 = 4$  metros para helicópteros dentro de las categorías H0 a H3.

Dado que la aeronave de diseño tiene un valor  $D = 14,14$  m, y sus dimensiones corresponden a una categoría H2.

$$\text{Área crítica práctica} = 14,14 \text{ m} \times (2,5 \text{ m} + 4 \text{ m}) = 14,14 \text{ m} \times 6,5 \text{ m} = 91,91 \text{ m}^2 \quad (10.69)$$

### 10.4.2. Cantidad de Agua y Espuma Necesaria

Según la normativa, la tasa de aplicación para el nivel de rendimiento de espuma C es de  $3.75 \text{ L/min/m}^2$ . Por lo tanto:

$$\text{Tasa descarga total} = \text{PCA} \times \text{Tasa aplicación} = 91,91 \text{ m}^2 \times 3,75 \text{ L/min/m}^2 = 344,66 \text{ L/min} \quad (10.70)$$

La duración mínima de descarga es de 5 minutos para vertipuertos elevados:

$$\text{Cantidad total agua} = \text{Tasa descarga total} \times \text{Duración} = 344,66 \text{ L/min} \times 5 \text{ min} = 1723,3 \text{ L} \quad (10.71)$$

En cuanto a la cantidad de espuma, utilizamos la tabla de la normativa que establece las cantidades necesarias para helipuertos elevados [EASA, 2022]. Dado que nuestra aeronave se clasifica como H2:



- Agua (L): 3000 L
- Tasa de descarga de solución de espuma (L/min): 600 L/min
- Espuma de nivel C: 2000 L
- Polvo químico seco (kg): 45 kg
- Medios gaseosos (kg): 18 kg

### 10.4.3. Instalaciones de Extinción y Equipamiento de Rescate

#### Tanques de Agua y Espuma

Para el almacenamiento de agua y espuma, se necesitarán tanques con la capacidad adecuada para albergar los volúmenes calculados. Esto incluye:

- **Tanque de agua:** Capacidad mínima de 3000 L.
- **Tanque de espuma:** Capacidad mínima de 2000 L.

#### Sistema de Extinción

El sistema de extinción se basará en un sistema de aplicación de espuma fija (FFAS), capaz de suministrar la espuma y el agua necesarios dentro del tiempo requerido.

#### Equipamiento de Rescate y Protección Personal (PPE)

Ítem	NFPA	EN	BS
Casco con visera	NFPA 1971	EN443	BS EN 443
Guantes	NFPA 1971	EN659	BS EN 659
Botas (calzado)	NFPA 1971	EN ISO 20345	BS EN ISO 20345
Túnica y pantalones	NFPA 1971	EN469	BS EN ISO 14116
Capucha de protección	NFPA 1971	EN 13911	BS EN 13911

Tabla 10.12: Equipamiento de Protección Personal (PPE). Fuente: [EASA, 2022].

Adicionalmente, el equipo de rescate debe incluir herramientas como llaves ajustables, hachas de rescate, cortadores de pernos, palancas, ganchos de salvamento, sierras de mano, mantas resistentes al fuego, escaleras de dos piezas, líneas de vida con arnés de rescate, alicates de corte lateral, juegos de destornilladores, cuchillos de arnés con funda, cortadores de arnés, máscaras de filtro MMMF, guantes resistentes al fuego y herramientas de corte motorizadas.

### 10.4.4. Estimación del Espacio Requerido

Para calcular el área total requerida para las instalaciones de emergencia:

- **Área para tanques de agua y espuma:** Asumiendo un área de almacenamiento compacta, cada tanque puede ocupar aproximadamente 1 m<sup>2</sup> por cada 1000 L, resultando en 5 m<sup>2</sup>.
- **Área del sistema de extinción:** Aproximadamente 10 m<sup>2</sup> para instalar y operar el FFAS.
- **Área para el equipamiento de rescate:** Incluyendo espacio para almacenamiento y acceso, se estima un total de 20 m<sup>2</sup>.

Por lo tanto, la estimación total del espacio requerido para las instalaciones de emergencia es de aproximadamente:

$$\text{Área total} = 5 \text{ m}^2 + 10 \text{ m}^2 + 20 \text{ m}^2 = 35 \text{ m}^2 \quad (10.72)$$

## 10.5. Dimensionamiento lado aire.

### 10.5.1. Tipología y posibles configuraciones

En este apartado, se comparan tres configuraciones principales para la distribución de un vertiport: lineal, satélite y pier. Estas configuraciones se evaluaron bajo las normativas recientes de la EASA para determinar cuál es la más adecuada en términos de utilización del espacio disponible, eficiencia operativa y capacidad de manejo de aeronaves. Se ha considerado una distribución con dos TLOFs y ocho puestos de estacionamiento, cuatro por cada TLOF, con el fin de maximizar la operatividad en el espacio limitado disponible.

#### Configuración Lineal

En una configuración lineal, los TLOFs se disponen en fila, lo cual es eficiente para distribuciones de espacio disponible alargadas y estrechas. Esta configuración permite despegues y aterrizajes en una dirección concreta, adaptándose bien a la dirección del viento predominante en el área de operación. Un ejemplo de esta configuración se muestra en la Figura 10.4, adaptada para cumplir con las normativas de la EASA.

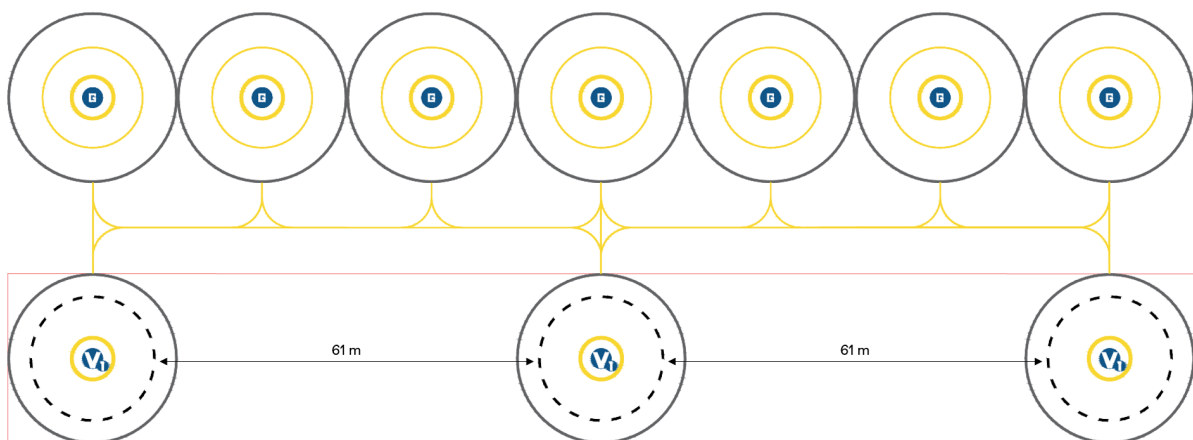


Figura 10.4: Ejemplo de topología lineal que cumple con la nueva regulación de la EASA.

La ventaja de esta configuración radica en su simplicidad y en la facilidad para gestionar operaciones en línea recta. Sin embargo, requiere espacio adicional en las direcciones de despegue y aterrizaje para cumplir con las regulaciones de superficie de aproximación y despegue. Además, las operaciones se pueden ver limitadas si la dirección del viento cambia, ya que la configuración lineal no es tan flexible para operaciones multidireccionales.

#### Configuración Pier

La configuración '*pier*' es una forma alternativa de distribución intermedia entre la lineal y la satélite. Se caracteriza por separar el área del TLOF de los puestos de estacionamiento, lo que permite ángulos de despegue y aterrizaje más amplios y aumenta la capacidad de los puestos de

estacionamiento. Esta configuración es adecuada para manejar un gran número de aeronaves y maximizar la utilización de los puestos de estacionamiento.

Sin embargo, compartir una única calle de rodaje puede aumentar los tiempos de giro de las aeronaves y congestionar el área de los puestos. Para mitigar estos problemas, se requiere un sistema de control de tráfico aéreo avanzado o múltiples calles de rodaje. La configuración *pier* puede ser beneficiosa en entornos donde se necesita flexibilidad para despegues y aterrizajes en múltiples direcciones, pero requiere una gestión cuidadosa del tráfico para evitar retrasos y congestiones.

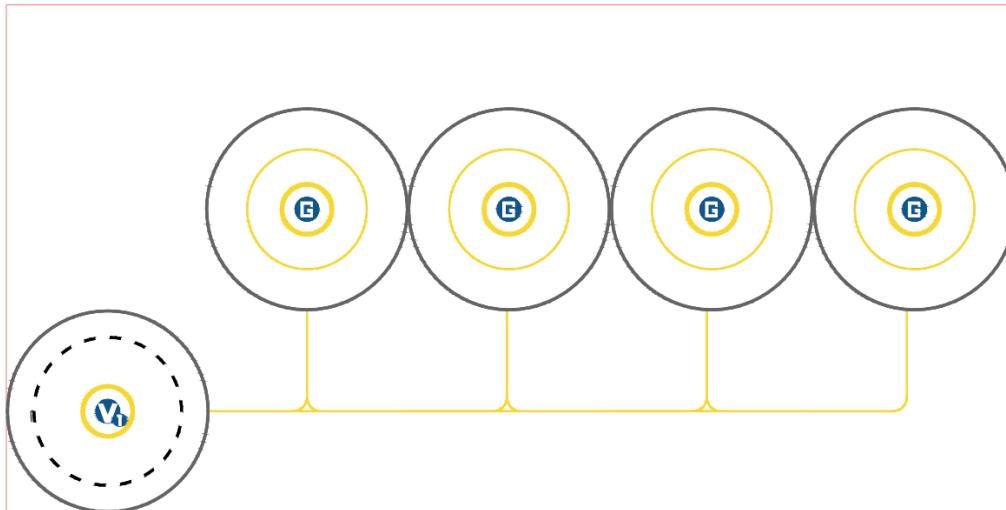


Figura 10.5: Ejemplo de topología *pier* que cumple con la nueva regulación de la EASA.

### Configuración Satélite

La configuración satélite es ideal para espacios compactos o geometrías particulares como áreas con aspecto cuadrangular o circular. En esta configuración, uno o más TLOFs están rodeados por varios puestos de estacionamiento, optimizando la utilización del área y minimizando la longitud de las calles de rodaje. Esta disposición permite una alta utilización de los puestos de estacionamiento, ya que la distancia de taxi es constante. La configuración satélite también facilita las operaciones simultáneas en múltiples direcciones, lo cual puede representar una ventaja considerable en entornos urbanos donde los vientos pueden ser variables.

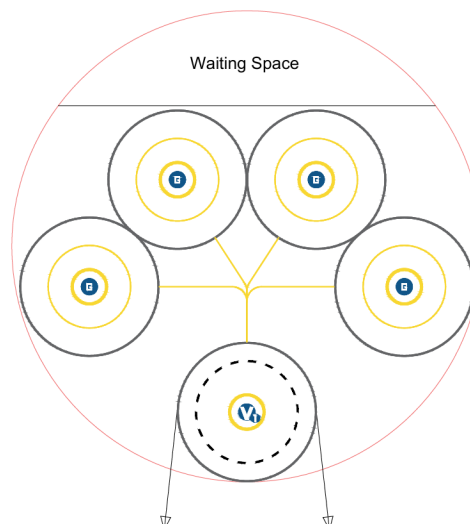


Figura 10.6: Ejemplo de topología satélite que cumple con la nueva regulación de la EASA.

Sin embargo, esta configuración tiene limitaciones en cuanto a la dirección de despegue y aterrizaje y puede presentar desafíos para integrarse con infraestructuras existentes. Además, requiere un diseño cuidadoso para garantizar que las operaciones no interfieran entre sí debido a la cercanía de los puestos de estacionamiento situados en las proximidades de las zonas de despegue y aterrizaje, especialmente cuando se realiza un planteamiento que considera un número elevado de puestos de estacionamiento.

Cada una de estas configuraciones tiene sus propias ventajas y limitaciones. En el contexto del vertipuerto propuesto, se ha optado por la implementación de la configuración pier debido a dos motivos principales. En primer lugar, el inconveniente que presenta no es relevante para el caso de aplicación debido a que se mantiene la TLOF cerrada siempre y cuando haya una aeronave realizando maniobra de taxi y, por otro lado, representa la geometría que mayor coeficiente de utilización del espacio representa de acuerdo a la geometría disponible del vertipuerto.

### 10.5.2. Distribución final del vertipuerto.

Una vez realizados todos los cálculos correspondientes tanto a las instalaciones como a las superficies de movimientos de aeronaves, este apartado realiza una propuesta para la distribución de las diferentes áreas requeridas en el vertipuerto.

Como puede apreciarse a lo largo de todo el documento, el vertipuerto ha sido dimensionado considerando que se encuentra elevado. El razonamiento detrás de este planteamiento reside principalmente en salvaguardar las servidumbres considerando la altura de los edificios que rodean el emplazamiento y el correcto funcionamiento del vertipuerto. De esta manera, se ha optado por un edificio de dos niveles: planta baja y planta 1. La planta a nivel de acceso será empleada con el único fin de disponer de parking, garantizando el acceso a plazas de aparcamiento dentro del entorno urbano en el que se encuentra y orientado a satisfacer la demanda de viajeros que empleen la infraestructura.

Por otro lado, en el primer nivel se ha distribuido el espacio disponible para albergar tanto las instalaciones que soportan la operación de pasajeros como las superficies de movimiento de aeronaves.

En cuanto a las servidumbres que comprenden el vertipuerto, debe establecerse como direcciones de operación predominantes la configuración E-W. De esta manera, ambas TLOFs deberán estar orientadas de acuerdo a esta distribución y no mostrar interferencias entre ellas. Por ello, se ha optado por asignar a cada una de ellas en los límites norte y sur, respectivamente, separadas con un mínimo de 16 m longitudinalmente de acuerdo a la normativa. Su distribución dentro del espacio disponible puede observarse en la Figura 10.7.

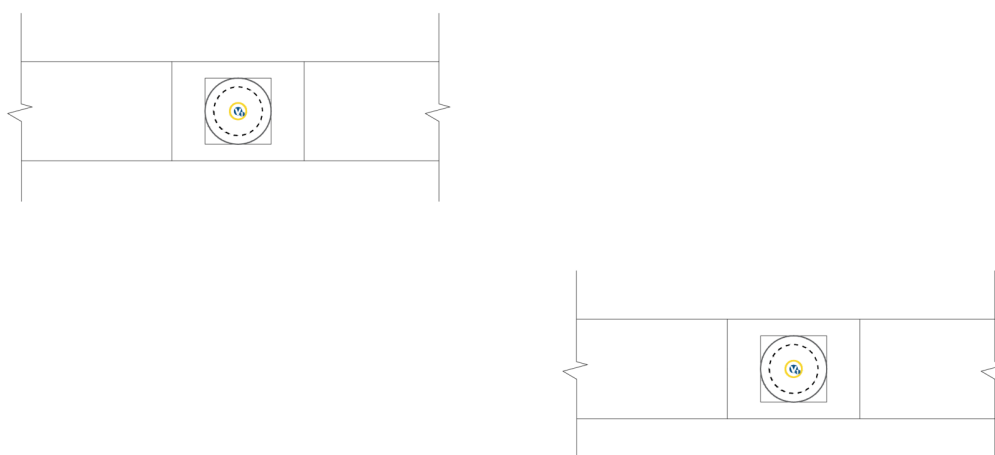


Figura 10.7: Distribución TLOF y servidumbres en el espacio disponible.

De acuerdo a lo establecido previamente en este documento, el vertipuerto deberá contar con un número de dos TLOFs y cuatro puestos de estacionamiento. Debido a la disponibilidad de espacio en la parcela asignada, se ha decidido llevar a cabo una distribución simétrica entre zonas de despegue y aterrizaje junto a sus estacionamientos de acuerdo a la Figura 10.8. Es decir, se propone asignar cuatro stands a cada una de las TLOF con el objetivo de dotar al vertipuerto con suficiente capacidad para la evolución de la demanda y mayor eficiencia del mismo.

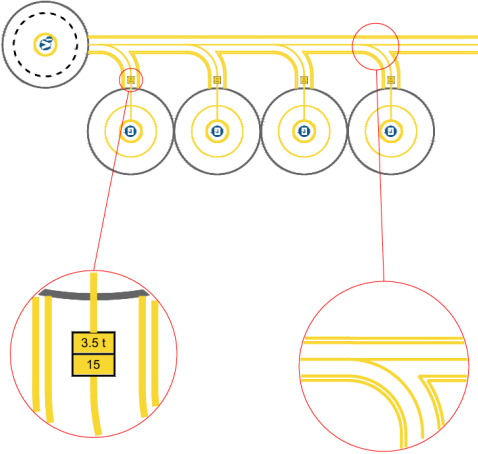


Figura 10.8: Distribución TLOF-stands elegida para el vertipuerto.



Figura 10.9: Distribución de las instalaciones en el emplazamiento.

Siguiendo la distribución planteada para cada una de las zonas de despegue y aterrizaje, así como la distribución de los stands que alimentan cada una de las mismas, se ha repartido el espacio de las instalaciones necesarias a lo largo del espacio de disponible.

Para ello, lado tierra y lado aire conviven en la misma distribución de planta, gráficamente separados por una línea roja en la Figura 10.9, que salvaguardan la separación de sendos flujos de pasajeros. Por otro lado, en el lado aire, se distribuyen dos hangares con capacidad para las aeronaves que sirven el vertipuerto, las instalaciones y equipos auxiliares de emergencia y una zona de embarque que se divide ambas zonas de movimiento y sirve ambos TLOFs.

Finalmente, la distribución final del vertipuerto surge de la combinación de la convivencia de ambos lados, tierra y aire, en una misma planta, con una elevación de 14 m del punto de referencia del vertipuerto, de acuerdo a la Figura 10.10.

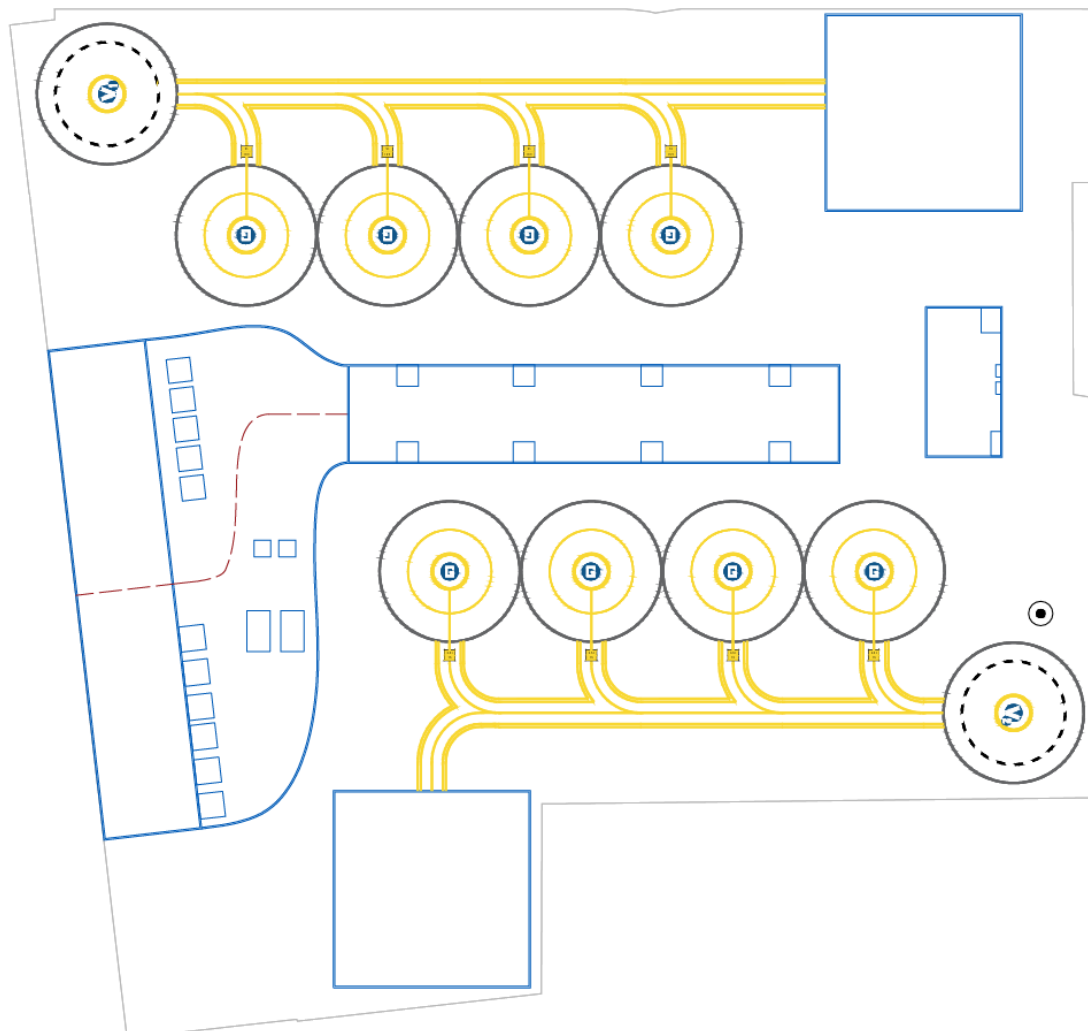
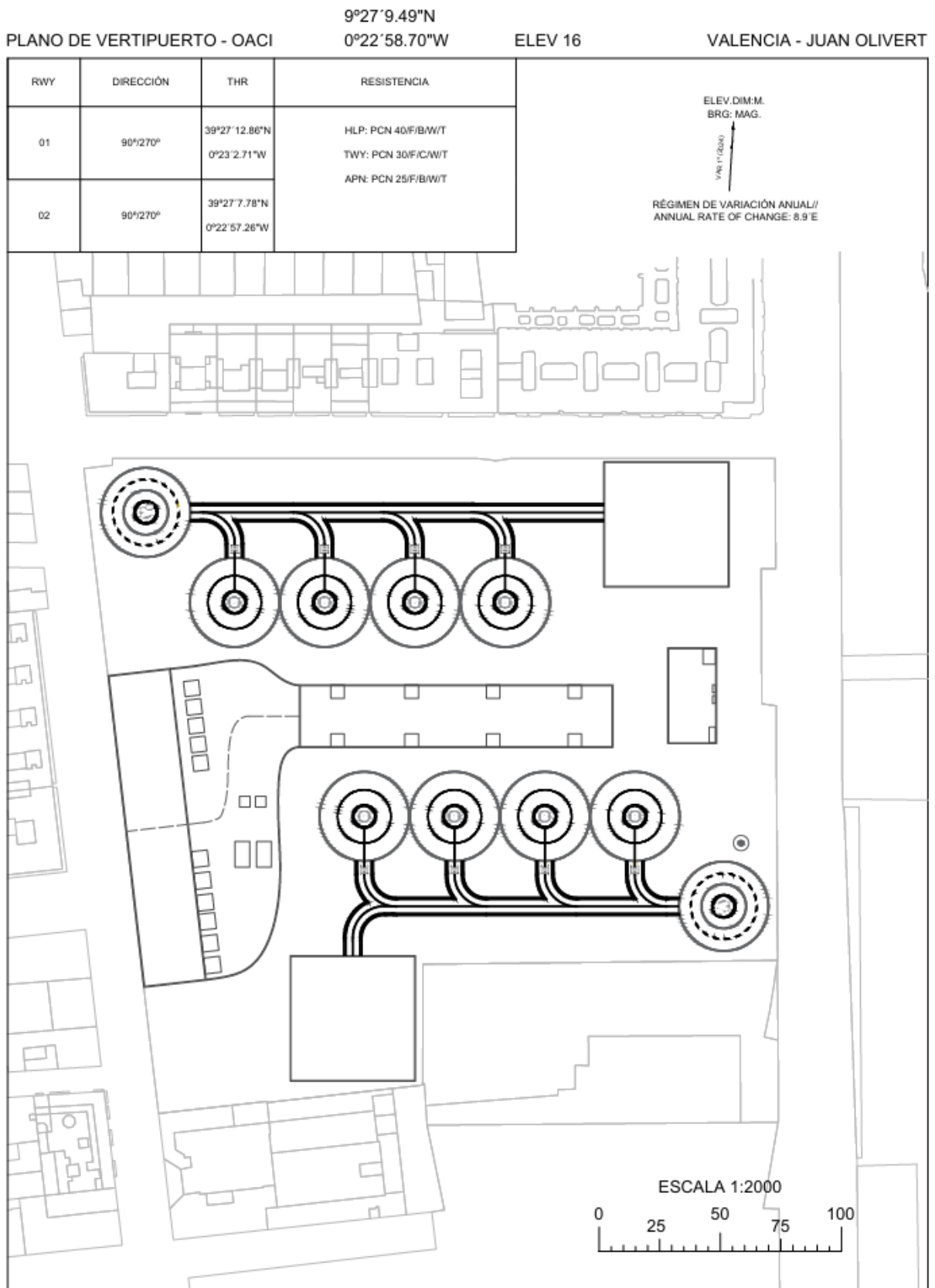


Figura 10.10: Distribución final en planta del vertipuerto.

## 10.6. Planos del vertipuerto.

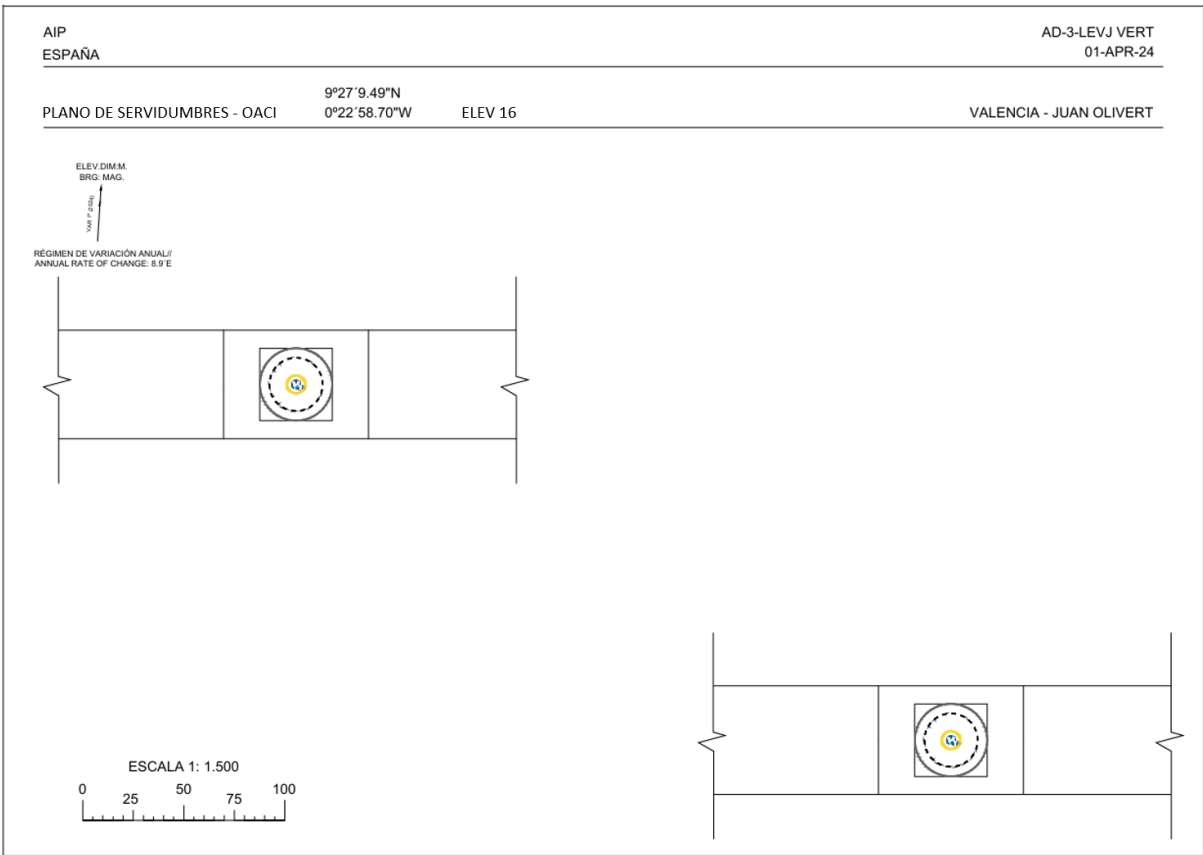
AIP  
ESPAÑA

AD-3-LEVJ VERT  
01-APR-24



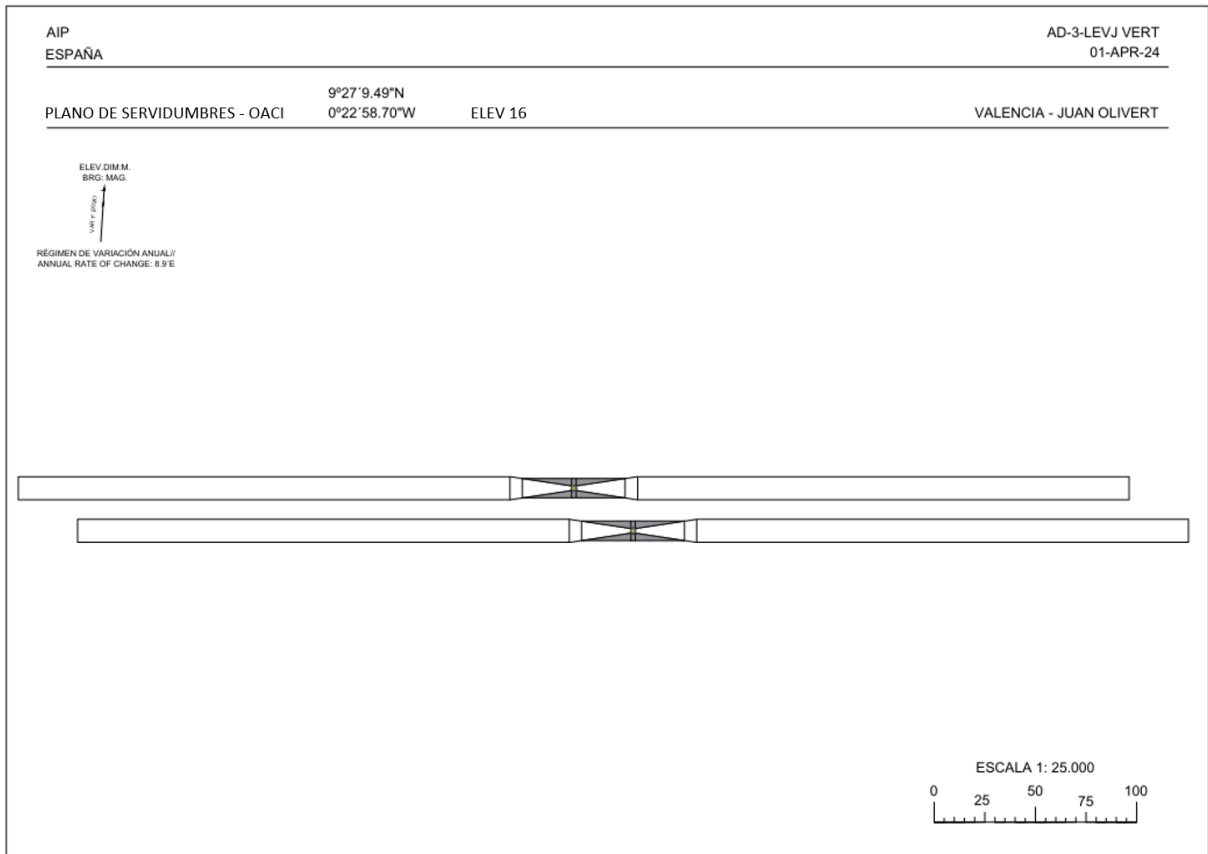
AIS-ESPAÑA

Figura 10.11: Plano del Vertipuerto.  
Página 137 de 170



AIS-ESPAÑA

Figura 10.12: Plano de servidumbres (1).



AIS-ESPAÑA

Figura 10.13: Plano de servidumbres (2).



# Capítulo 11

## Servicio de taxi aéreo. Caso de negocio

En este capítulo, se desarrollará el caso de negocio para la implementación de un servicio de taxi aéreo en Valencia mediante la utilización de una flota de aeronaves eVTOL, específicamente el modelo Lillium como aeronave de diseño con la que se ha elaborado el diseño de la infraestructura. A partir del análisis de la demanda y el dimensionamiento del vertipuerto realizado en los capítulos anteriores, se evaluará la viabilidad económica de este innovador servicio de movilidad urbana.

Para ello, se ha llevado a cabo un planteamiento de aspectos financieros críticos para la explotación de este servicio como la adquisición y costes de las aeronaves, el consumo de energía y costes de recarga, los costes de personal, o tarifas aeroportuarias. Además, se analizará el impacto de las baterías en los costes operativos, las tarifas y estrategias de precio para abordar un modelo de negocio rentable, y los retornos generados para el operador en un marco temporal de 10 años.

Este modelo de negocio estará centrado en un operador de aerotaxis que buscará ofrecer una alternativa eficiente y sostenible al transporte tradicional, en el corto y largo radio, aprovechando las ventajas de los eVTOL para reducir la congestión y mejorar la movilidad en Valencia.

### 11.1. Adquisición y Costes de Aeronaves

#### 11.1.1. Análisis de la Demanda y Necesidades de Flota

Para proyectar la demanda y calcular el número de aeronaves necesarias, utilizamos como referencia un CAGR del 3,6% para la estimación del crecimiento de pasajeros anuales [Pavan Yedavalli]. Basándonos en la demanda actual y futura, calculamos las necesidades de flota considerando la ocupación media de las aeronaves eVTOL, los pasajeros hora diseño y pico. Este análisis es fundamental para asegurar que la flota pueda satisfacer la demanda sin incurrir en costes innecesarios o enfrentar problemas de capacidad insuficiente.

El análisis se ha realizado en tres horizontes, tomando como base los ratios de crecimiento y escenarios establecidos en el *Plan Director del Aeropuerto de Valencia*. El horizonte 2 se considera el escenario realista basado en los datos actuales, mientras que el horizonte 1 es el pesimista y el horizonte 3 el optimista. Además, se ha considerado un 10% extra de aeronaves como medida de prevención ante posibles escenarios donde alguna aeronave quede fuera de servicio.

La proyección de demanda de acuerdo a los tres horizontes es la siguiente:

Para determinar el número de aeronaves necesarias, consideramos la duración del vuelo más largo (50 minutos), el tiempo de recarga en el destino (37 minutos), el vuelo de vuelta (50 minu-

Año	2025	2026	2027	2028	2029
<b>Horizonte 1 (Pesimista)</b>					
Pasajeros Anuales	38304	39662	41085	42573	44129
PHP	5	5	5	5	6
AHP	3	3	3	3	4
Flota Necesaria	4	4	4	4	5
<b>Horizonte 2 (Realista)</b>					
Pasajeros Anuales	43800	45376	47009	48702	50457
PHP	7	7	7	8	8
AHP	4	4	4	5	5
Flota Necesaria	5	5	5	6	6
<b>Horizonte 3 (Optimista)</b>					
Pasajeros Anuales	49770	51559	53395	55281	57219
PHP	8	8	8	9	9
AHP	5	5	5	6	6
Flota Necesaria	6	6	6	7	7

Tabla 11.1: Proyección de Demanda de Pasajeros y Necesidades de Flota (2025-2029)

Año	2030	2031	2032	2033	2034
<b>Horizonte 1 (Pesimista)</b>					
Pasajeros Anuales	45754	47460	49237	51088	53014
PHP	6	6	6	6	7
AHP	4	4	4	4	4
Flota Necesaria	5	5	5	5	6
<b>Horizonte 2 (Realista)</b>					
Pasajeros Anuales	52277	54163	56118	58144	60244
PHP	8	8	9	9	10
AHP	5	5	5	6	6
Flota Necesaria	6	6	6	7	7
<b>Horizonte 3 (Optimista)</b>					
Pasajeros Anuales	59209	61236	63326	65502	67756
PHP	9	9	10	10	11
AHP	6	6	6	7	7
Flota Necesaria	7	7	7	8	8

Tabla 11.2: Proyección de Demanda de Pasajeros y Necesidades de Flota (2030-2034)

tos) y el tiempo de recarga en el origen (37 minutos). Esto da un total de 174 minutos por ciclo operativo completo. Asumiendo que una aeronave puede realizar este ciclo aproximadamente 8 veces al día, podemos determinar si la flota proyectada puede absorber dicha demanda.

$$\text{Vuelos diarios} / \text{aeronave} = \frac{24}{50 + 37 + 50 + 37} \approx 8 \quad (11.1)$$

Con estos cálculos, aseguramos que la flota pueda satisfacer la demanda de los diferentes horizontes. Ahora, procederemos a calcular los costes asociados para el horizonte 2 (realista).

## 11.2. Costes de Explotación

### 11.2.1. Costes Salariales

La estructura de personal necesaria para operar el servicio de taxi aéreo debe estar bien definida para asegurar que todas las operaciones se realicen de manera eficiente y segura. A continuación, se plantea una estructura de personal mínima requerida, considerando roles críticos y el número de empleados por perfil para lograr un funcionamiento adecuado. Adicionalmente, se proyecta el crecimiento del equipo según la demanda en el periodo de 10 años considerando el Horizonte 2, donde el ratio de crecimiento de cada área de trabajo será proporcional al crecimiento de la demanda. La estructura de personal básico se relaciona con el año 1 (2025).

Personal	Unidades
Director Técnico	1
Comercial y Marketing	1
Recursos Humanos	1
Técnicos de Mantenimiento	1/aeronave
Asistencia	4
Handling	1/aeronave
Administrativos	3
Pilotos	10

Tabla 11.3: Estructura de Personal Básico (2025).

En la siguiente tabla, se muestra la proyección de crecimiento del equipo según los cálculos realizados en base a los ratios de crecimiento establecidos y el aumento proyectado de la demanda en el Horizonte 2.

Personal	2025	2026	2027	2028	2029
Director Técnico	1	1	1	1	1
Comercial y Marketing	1	1	1	1	1
Recursos Humanos	1	1	1	1	1
Técnicos de Mantenimiento	5	5	5	6	6
Asistencia	4	4	4	5	5
Handling	5	5	5	6	6
Administrativos	3	3	3	4	4
Pilotos	10	10	10	12	12

Tabla 11.4: Proyección de Crecimiento del Equipo (2025-2029)

Personal	2030	2031	2032	2033	2034
Director Técnico	1	1	1	1	1
Comercial y Marketing	1	1	2	2	2
Recursos Humanos	1	1	2	2	2
Técnicos de Mantenimiento	6	6	7	7	7
Asistencia	5	5	6	6	6
Handling	6	6	7	7	7
Administrativos	4	4	5	5	5
Pilotos	12	12	14	14	14

Tabla 11.5: Proyección de Crecimiento del Equipo (2030-2034)

Para asegurar una correcta proyección de los costes asociados al personal, se presenta la siguiente tabla con los salarios mensuales, el coste mensual y el coste anual por perfil del personal

en el primer año. Se aplicará un incremento del 3 % anual debido a la inflación para los siguientes años.

<b>Personal</b>	<b>Salario / mes (€)</b>	<b>Coste / mes (€)</b>	<b>Coste Anual (€)</b>
Director Técnico	2,350	3,055	36,664
Comercial y Marketing	1,951	2,536	30,437
Recursos Humanos	1,641	2,133	25,607
Técnicos de Mantenimiento	1,457	1,894	22,723
Asistencia	1,160	1,508	18,961
Handling	1,160	1,508	18,961
Administrativos	1,215	1,580	18,961
Pilotos	3,500	4,550	54,600

Tabla 11.6: Costes Anuales de Salarios (2025)

A continuación, se presenta la proyección de los costes salariales anuales del equipo, considerando el crecimiento del personal y un incremento del 3 % anual debido al IPC. En estas tablas, el coste de los pilotos se muestra pero no se imputa en el coste total.

<b>Año</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>
Coste Salarial Total sin Pilotos (€)	433.855	446.871	460.277	474.085	488.308

Tabla 11.7: Proyección de Costes Salariales Anuales sin Pilotos (2025-2029)

<b>Año</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>
Coste Salarial Total sin Pilotos (€)	502.957	518.046	533.587	549.594	566.081

Tabla 11.8: Proyección de Costes Salariales Anuales sin Pilotos (2030-2034)

### 11.2.2. Costes de Mantenimiento

La vida útil de las aeronaves se ha estimado aproximadamente en 20 años, de acuerdo a los períodos planteados para la amortización. Durante este período, es necesario realizar ciclos de mantenimiento preventivo y correctivo para garantizar su operatividad. Asumimos un coste de mantenimiento anual por aeronave de 150,000 €. La tabla a continuación resume el coste total de mantenimiento:

<b>Año</b>	<b>Coste de Mantenimiento (€)</b>
2025	750.000
2026	750.000
2027	750.000
2028	900.000
2029	900.000
2030	900.000
2031	900.000
2032	1.050.000
2033	1.050.000
2034	1.050.000

Tabla 11.9: Coste Anual de Mantenimiento de las Aeronaves (2025-2034)

### 11.2.3. Costes de Baterías

#### Coste de Baterías Nuevas

Tomando como referencia precios de mercado actualmente, el coste de un battery pack de las características para una aeronave eVTOL Lilium se estima en 650 €/kWh. Considerando que cada batería presenta una capacidad de 38 kWh, lo que implica un coste inicial de:

$$\text{Coste de una batería nueva} = 650 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \times 38 \text{ kWh} = 24.700 \text{ €} \quad (11.2)$$

Se toma como hipótesis que el coste de las baterías en términos de €/kWh se reducirá en un 5% cada año debido a avances tecnológicos y economías de escala.

#### Vida Útil de las Baterías

La vida útil de las baterías de los eVTOL se estima en 3000 ciclos de carga/descarga, ciclos que describen el estado de arte actual para tecnologías Li-ion NMC. Para determinar la duración de una batería en términos operativos, calculamos el número de ciclos de carga que cada aeronave realiza en un año y comparamos con la vida útil de las baterías.

$$\text{Ciclos de carga diarios} = \frac{24 \text{ horas}}{0,5 \text{ horas (vuelo)} + 0,6167 \text{ horas (carga)}} \approx 21 \quad (11.3)$$

$$\text{Ciclos de carga anuales} = 21 \times 365 \approx 7,665 \quad (11.4)$$

$$\text{Duración de la batería} = \frac{3000 \text{ ciclos}}{21 \text{ ciclos/día}} \approx 142,86 \text{ días} \quad (11.5)$$

#### Estrategias de Recarga y Sustitución

Dado que cada batería tiene una vida útil de aproximadamente 142.86 días en condiciones de operación continua, esto implica que cada aeronave necesitaría al menos 2.5 baterías adicionales por año. Sin embargo, dado que las operaciones no serán completamente continuas, asumiremos una necesidad de 2 baterías adicionales por año para cada aeronave.

#### Impacto de las Baterías en los Costes Operativos

Para calcular el número total de baterías adicionales necesarias anualmente y su coste total, consideramos la flota operativa proyectada y el número de baterías requeridas por aeronave. A continuación se presentan los cálculos para los próximos 10 años, con la reducción anual del 5% en el coste de las baterías.

Año	Total Baterías Adicionales	Coste por Batería (€)	Coste Total (€)
2025	10	24.700	247.000
2026	10	23.465	234.650
2027	10	22.292	222.920
2028	12	21.177	254.124
2029	12	20.118	241.416

Tabla 11.10: Costes Anuales de Baterías (2025-2029)

<b>Año</b>	<b>Total Baterías Adicionales</b>	<b>Coste por Batería (€)</b>	<b>Coste Total (€)</b>
2030	12	19.112	229.344
2031	12	18.156	217.872
2032	14	17.248	241.472
2033	14	16.386	229.404
2034	14	15.567	217.938

Tabla 11.11: Costes Anuales de Baterías (2030-2034)

Como puede observarse en los cálculos realizados, el coste de las baterías representa un componente muy relevante en la estructura de costes operativos de un operador de eVTOL. A pesar de la consideración de una reducción anual del coste por kWh debido a mejoras tecnológicas, las baterías siguen siendo un factor significativo en los costes operativos.

### 11.3. Costes de Ventas

#### 11.3.1. Tarifas Aeroportuarias

Para el cálculo de las tarifas aeroportuarias del vertipuerto se ha tomado como referencia las publicadas por AENA para la operación de operaciones comerciales en el helipuerto de Málaga, las cuales vienen principalmente referenciadas al MTOW de la aeronave que lleva a cabo la operación, así como de un coeficiente relacionado con el mismo. Siguiendo lo estipulado para las aeronaves de las características de Lilium, con una masa máxima al despegue de 3175 kg, se corresponde un coeficiente de 0,1316. Además, las tarifas aeroportuarias comprenden una tasa impositiva según la operación a realizar por la aeronave. En el caso de estudio, se ha considerado que cada operación incluye las siguientes actividades descritas:

<b>Tipo tarifa</b>	<b>Precio por MTOW</b>	<b>Cuantía mínima</b>
Aterrizaje	6,91	93,95
Transito	3,12	46,49
Pasaje		
Pasajeros Salida	5,92	
PMR	0,71	
Seguridad	3,38	
Pasajeros Llegada	0,049	
Estacionamientos	Por periodo de 15 minutos x Tm	Cuantía máxima
	0,1354	1810,92
Uso servicios en tierra	A aplicar según coeficiente	
Asistencia equipajes	70,64	
Asistencia Ops en pista	22,44	
Limpieza y servicio Aeronave	12,32	
Catering	18,77	
Mostradores	Precio por hora	Cuantía máxima
	10,12	80,96

Tabla 11.12: Tarifas Aeroportuarias en Málaga en euros (Eliminando Combustibles).

De esta forma, se han proyectado los costes asociados a dichas tarifas según las operaciones previstas anualmente:

Año	Vuelos Anuales	Coste Tarifas (€)
2025	15.330	1.882.227
2026	18.151	2.229.169
2027	21.154	2.596.074
2028	24.351	2.988.339
2029	25.229	3.096.830
2030	26.139	3.208.520
2031	27.082	3.323.466
2032	28.059	3.441.725
2033	29.072	3.563.358
2034	30.122	3.688.426

Tabla 11.13: Costes de Tarifas Aeroportuarias del Vertipuerto (2025-2034)

### 11.3.2. Costes de Recarga de Baterías

Para calcular el coste total de recarga de las aeronaves eVTOL, es necesario establecer un coste por kWh de electricidad referente a las operaciones de recarga de las aeronaves. En Valencia, el precio medio de la electricidad se encuentra en 0,1446 €/kWh (año 2024). Este coste puede variar ligeramente dependiendo de factores como la demanda y la oferta de electricidad, los tramos horarios, así como las políticas energéticas vigentes. Sin embargo, utilizaremos este valor como referencia para los siguientes cálculos.

#### Ciclos de Carga Mensuales

Para estimar el número de ciclos de carga completos que una batería de eVTOL necesitará en un mes de operación normal, es necesario considerar el número de operaciones diarias y la capacidad de la batería. Cada aeronave eVTOL Lilium tiene una batería con una capacidad de 38 kWh y el tiempo de carga completa es de 37 minutos.

Asumiendo que el vertipuerto opera 24 horas al día y que cada aeronave realiza operaciones continuas, podemos calcular el número de ciclos de carga necesarios por aeronave. Si consideramos que cada aeronave realiza un ciclo completo de carga después de cada vuelo y que hay una ocupación media de 2 pasajeros por vuelo, podemos estimar el número de vuelos diarios y, por lo tanto, los ciclos de carga mensuales.

$$\text{Vuelos diarios / aeronave} = \frac{24}{50 + 37 + 50 + 37} \approx 8 \quad (11.6)$$

$$\text{Ciclos de carga mensuales / aeronave} = 8 \times 30 \approx 240 \quad (11.7)$$

#### Coste Total de Recarga

Conociendo el número de ciclos de carga mensuales y el coste por kWh, podemos calcular el coste total de recarga mensual por aeronave. Para ello, utilizamos la siguiente fórmula:

$$\text{Coste recarga mes / aeronave} = \text{Ciclos carga / mes} \times \text{Capacidad} \times \text{Coste / kWh} \quad (11.8)$$

Sustituyendo los valores:

$$\text{Coste recarga mes / aeronave} = 240 \times 38 \times 0,1446 \approx 1.318,75 \text{ €} \quad (11.9)$$

Finalmente, para calcular el coste total de recarga mensual para toda la flota, multiplicamos el coste mensual por aeronave por el número total de aeronaves operativas en cada año. La tabla siguiente muestra el coste total de recarga mensual y anual para la flota proyectada:

Año	2025	2026	2027	2028	2029
<b>Aeronaves Operativas</b>	5	5	5	6	6
<b>Coste Mensual por Aeronave (€)</b>	1.318,75	1.318,75	1.318,75	1.318,75	1.318,75
<b>Coste Total Mensual (€)</b>	6.593,75	6.593,75	6.593,75	7.912,50	7.912,50
<b>Coste Total Anual (€)</b>	79.125,00	79.125,00	79.125,00	94.950,00	94.950,00

Tabla 11.14: Coste Total de Recarga Mensual y Anual (2025-2029)

Año	2030	2031	2032	2033	2034
<b>Aeronaves Operativas</b>	6	6	7	7	7
<b>Coste Mensual por Aeronave (€)</b>	1.318,75	1.318,75	1.318,75	1.318,75	1.318,75
<b>Coste Total Mensual (€)</b>	7.912,50	7.912,50	9.231,25	9.231,25	9.231,25
<b>Coste Total Anual (€)</b>	94.950,00	94.950,00	110.775,00	110.775,00	110.775,00

Tabla 11.15: Coste Total de Recarga Mensual y Anual (2030-2034)

### 11.3.3. Salarios de Pilotos

Aunque el coste salarial de los pilotos suele ser incluido en los costes salariales, se ha decidido imputarlo como un coste asociado a venta debido a su remuneración asociada al número de vuelos que realizan. De esta forma, a continuación se detalla el coste anual asociado a los pilotos, considerando un incremento del 3% anual debido a la inflación:

Año	Número de Pilotos	Coste Total (€)
2025	10	420.000
2026	10	432.600
2027	10	445.578
2028	12	458.945
2029	12	472.714
2030	12	486.895
2031	12	501.502
2032	14	516.547
2033	14	532.043
2034	14	548.004

Tabla 11.16: Costes Salariales de Pilotos (2025-2034)

### 11.3.4. Costes de Comercial/Marketing

Para proyectar los costes de comercialización y marketing, se ha tomado como referencia una hipótesis en la cual estos costes representan un 20% del total de los costes de ventas en el año 2025. Este porcentaje se reducirá progresivamente año tras año hasta alcanzar un 3% en el año 2034. Esta reducción progresiva se debe a la expectativa de que, a medida que la marca se consolide en el mercado y se logre una mayor eficiencia en las estrategias de marketing, la necesidad de inversión en estas áreas disminuirá.



## Cálculo de Costes de Comercial/Marketing

Para calcular los costes de comercialización y marketing anuales, utilizamos la siguiente fórmula:

$$\text{Coste Comercial/Marketing} = \text{Porcentaje} \times \text{Costes de Ventas} \quad (11.10)$$

Donde el porcentaje inicial es del 20 % en 2025, reduciéndose anualmente hasta el 3 % en 2034.

Año	Porcentaje Comercial/Marketing	Coste Comercial/Marketing (€)
2025	20 %	575.635
2026	18 %	578.806
2027	16 %	571.682
2028	14 %	553.653
2029	12 %	486.119
2030	10 %	415.109
2031	9 %	382.336
2032	8 %	348.536
2033	6 %	268.209
2034	3 %	137.645

Tabla 11.17: Costes de Comercial/Marketing (2025-2034)

Esta tabla muestra la progresión de los costes de comercialización y marketing a lo largo del período proyectado, ajustándose a la reducción del porcentaje aplicado sobre los costes de ventas anuales. Este enfoque permite una planificación financiera sostenible y realista, acorde con el crecimiento esperado y la consolidación de la marca en el mercado.

## 11.4. Costes Financieros y Amortización

### 11.4.1. Costes Financieros

A continuación se detallan los costes financieros asociados a los préstamos tomados para la adquisición de las aeronaves, asumiendo un interés anual del 4 %.

Año	Préstamo (€)	Interés Anual (€)	Amortización Anual (€)
2025	46.000.000	1.840.000	2.300.000
2026	46.000.000	1.840.000	2.300.000
2027	46.000.000	1.840.000	2.300.000
2028	56.052.088	2.242.083	2.802.604
2029	56.052.088	2.242.083	2.802.604
2030	56.052.088	2.242.083	2.802.604
2031	56.052.088	2.242.083	2.802.604
2032	67.365.803	2.694.631	3.368.290
2033	67.365.803	2.694.631	3.368.290
2034	67.365.803	2.694.631	3.368.290

Tabla 11.18: Costes Financieros (2025-2034)

## 11.4.2. Costes de Amortización

La amortización de las aeronaves se realizará en un período máximo de 20 años con un coeficiente máximo de 5% anual. Esta metodología asegura que los costes se distribuyan de manera equitativa a lo largo de la vida útil de las aeronaves, permitiendo una planificación financiera más estable y predecible.

Año	Amortización de Aeronaves (€)
2025	2.300.000
2026	2.300.000
2027	2.300.000
2028	2.802.604
2029	2.802.604
2030	2.802.604
2031	2.802.604
2032	3.368.290
2033	3.368.290
2034	3.368.290

Tabla 11.19: Costes de Amortización (2025-2034)

## 11.5. Estimación de Facturación y Beneficios a Largo Plazo

Para proyectar los resultados netos de la empresa a lo largo de los próximos 10 años, hemos considerado una serie de hipótesis y cálculos detallados. A continuación, se describen las hipótesis, los cálculos de los ingresos necesarios y los resultados netos proyectados.

### 11.5.1. Hipótesis Iniciales

Las hipótesis iniciales son fundamentales para proyectar los ingresos y los resultados netos de la empresa. Estas hipótesis se basan en datos de mercado, costos operativos y crecimiento proyectado de la demanda. Las hipótesis principales incluyen:

- **Crecimiento de la demanda:** Utilizamos un CAGR del 3.6 % para estimar el crecimiento de pasajeros anuales.
- **Ocupación media:** La ocupación media de las aeronaves eVTOL se estima en 2 pasajeros por vuelo.
- **Incremento de la tarifa:** La tarifa por vuelo se incrementará anualmente en un 3 % para ajustarse a la inflación.
- **Captura de mercado:** Se estima que el primer año se capturará el 70 % del mercado proyectado, aumentando gradualmente hasta el 100 % en el sexto año.
- **Margen de resultado neto:** Se busca alcanzar un margen de resultado neto en torno al 5-6 % sobre ventas a partir del sexto año, tomando como referencia las aerolíneas de referencia, [IAG, 2023].
- **Impuestos:** El impuesto sobre beneficios se estima en un 25 %, [IAG, 2023].

### 11.5.2. Distribución de Costes Anuales

A continuación se presenta el desglose de los costes anuales para el periodo 2025-2034, consolidado en categorías principales de costes.

Año	2025	2026	2027	2028	2029
Costes de Ventas (€)	2.269.975,40	2.709.391,40	3.199.898,02	3.889.908,32	4.172.375,16
Costes de Explotación (€)	1.747.000,00	1.734.650,00	1.722.920,00	2.054.124,00	2.041.416,00
Costes de Amortización (€)	2.300.000,00	2.300.000,00	2.300.000,00	2.802.604,00	2.802.604,00
Costes Financieros (€)	1.840.000,00	1.840.000,00	1.840.000,00	2.242.083,00	2.242.083,00
Costes Totales (€)	8.156.975,40	8.584.041,40	9.062.818,02	10.988.719,32	11.258.478,16

Tabla 11.20: Costes Totales Anuales (2025-2029)

Año	2030	2031	2032	2033	2034
Costes de Ventas (€)	4.460.628,00	4.528.020,00	4.817.939,00	4.884.506,00	4.997.955,00
Costes de Explotación (€)	2.029.344,00	2.017.872,00	2.341.472,00	2.329.404,00	2.317.938,00
Costes de Amortización (€)	2.802.604,00	2.802.604,00	3.368.290,00	3.368.290,00	3.368.290,00
Costes Financieros (€)	2.242.083,00	2.242.083,00	2.694.631,00	2.694.631,00	2.694.631,00
Costes Totales (€)	11.534.659,00	11.590.579,00	13.222.332,00	13.276.831,00	13.378.814,00

Tabla 11.21: Costes Totales Anuales (2030-2034)

### 11.5.3. Proyección de Ingresos y Resultados Netos

Para alcanzar los ingresos y resultados netos proyectados, se proyecta una rentabilidad sostenida que permita un margen adecuado a largo plazo. De esta forma, en la Tabla 11.22 se presenta la proyección de ingresos totales y resultados netos, ajustada para mantener un margen de resultado neto del 5-6 % después de alcanzar el breakeven.

Año	Ingresos Totales (€)	Costes Totales (€)	EBT (€)	Resultados Netos (€)
2025	6.115.733,57	8.156.975,40	(2.041.241,83)	(2.041.241,83)
2026	7.012.138,92	8.584.041,40	(1.571.902,48)	(1.571.902,48)
2027	8.007.120,42	9.062.818,02	(1.055.697,60)	(1.055.697,60)
2028	9.078.370,36	10.988.719,32	(1.910.348,96)	(1.910.348,96)
2029	10.545.518,59	11.258.478,16	(712.959,57)	(712.959,57)
2030	12.447.473,74	11.534.659,00	912.814,74	684.611,06
2031	12.598.455,43	11.590.579,00	1.007.876,43	755.907,33
2032	14.434.860,26	13.222.332,00	1.212.528,26	909.396,20
2033	14.557.928,73	13.276.831,00	1.281.097,73	960.823,30
2034	14.756.044,85	13.378.814,00	1.377.230,85	1.032.923,14

Tabla 11.22: Proyección de Ingresos Totales, Costes Totales y Resultados Netos (2025-2034)

### 11.5.4. Cálculo del ROI

El retorno sobre la inversión (ROI) a largo plazo se estima en un 6 % sobre las ventas a partir del sexto año, proporcionando una base sólida para el crecimiento y la expansión futura de las operaciones, siempre y cuando se mantenga la cuota de mercado sobre la demanda.

$$\text{ROI} = \frac{\text{Resultado Neto}}{\text{Ingresos Totales}} \times 100$$

Donde el coste total incluye todos los costes de adquisición de aeronaves, mantenimiento, personal, recarga y otros costes operativos.

## 11.6. Cálculo de la Tarifa por Vuelo

Una vez establecidas las previsiones financieras que permitirían alcanzar una sostenibilidad económica del operador, y asegurar un margen de resultado neto del 5-6 % sobre las ventas a

Año	Ingresos Totales (€)	Resultado Neto (€)	ROI (%)
2030	12.447.473,74	684.611,06	5,50
2031	12.598.455,43	755.907,33	6,00
2032	14.434.860,26	909.396,20	6,30
2033	14.557.928,73	960.823,30	6,60
2034	14.756.044,85	1.032.923,14	7,00

Tabla 11.23: Cálculo del ROI (2030-2034)

partir del sexto año, se procede a calcular la tarifa por vuelo resultante como estrategia comercial, planteada como constante pero que deberá ser ajustada anualmente de acuerdo con la inflación, estimada en un 3%.

$$\text{Tarifa inicial por vuelo} = \frac{\text{Costes operativos anuales} + \text{Margen de beneficio}}{\text{Número de vuelos anuales}} \quad (11.11)$$

La tarifa inicial por vuelo en el primer año se ha calculado en 395,07 € (2025). Esta tarifa se incrementará anualmente en un 3% para ajustarse a la inflación.

Año	Vuelos Anuales	Tarifa por Vuelo (€)
2025	15.480	395,07
2026	17.232	406,93
2027	19.104	419,13
2028	21.029	431,71
2029	23.716	444,66
2030	27.178	458,00
2031	28.154	447,48
2032	29.170	494,85
2033	30.225	481,65

Tabla 11.24: Proyección de Vuelos Anuales y Tarifa por Vuelo (2025-2034)

### 11.6.1. Cálculo de la Tarifa por Pasajero

Considerando una ocupación media de 2 pasajeros por vuelo, la tarifa por pasajero se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tarifa por pasajero} = \frac{\text{Tarifa por vuelo}}{2} = \frac{458,00}{2} \approx 229,00 \text{ €/pasajero} \quad (11.12)$$

### 11.6.2. Cálculo de la Tarifa por Kilómetro

Para convertir la tarifa por vuelo a tarifa por kilómetro, asumimos una distancia media de 160 km por vuelo:

$$\text{Tarifa por km} = \frac{\text{Tarifa por vuelo}}{160 \text{ km}} \quad (11.13)$$

Para el primer año:

$$\text{Tarifa por km} = \frac{458,00}{160} \approx 2,86 \text{ €/km} \quad (11.14)$$

El ratio obtenido de 2.86 €/km se considera una tarifa de precio competitiva. Para validar esta afirmación, se ha realizado una comparación del resultado obtenido con otros servicios comerciales, en este caso de helicópteros, de diferentes operadoras a nivel europeo y mundial. Como puede observarse en la Tabla 11.25, las operadoras de helicópteros, que ofrecen servicios de transporte aéreo en rutas similares, presentan tarifas que oscilan entre 0.67 €/km y 11.88 €/km, dependiendo de factores como la distancia, la demanda del mercado y los costes operativos específicos de cada operador. Nuestra tarifa se posiciona bien dentro de este rango, lo que sugiere que el modelo de negocio es viable y competitivo en el mercado actual de transporte aéreo. Esta competitividad resulta significativa de cara a atraer a los clientes y asegurar una cuota de mercado significativa desde el inicio de las operaciones.

<b>Ruta</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Operador</b>	<b>Flota</b>	<b>Precio (€)</b>	<b>€/Km</b>
Ceuta - Melilla	225	Helity	2	150	0,67
Ceuta - Málaga	115	Helity	2	150	1,30
Ceuta - Algeciras	29	Helity	2	60	2,07
Niza - Mónaco	18.5	Heli Air Monaco	14	1400	7,57
Foggia - Vieste	70.5	Alidaunia	9	59	0,83
Vieste - Isole Tremiti	61.5	Alidaunia	9	59	0,95
Aeropuertos NYC	23	NYC Helicopter	10	866	37,65
Macau - Hong Kong	63.5	Sky Shuttle	5	511	8,05
Macau - Shenzhen	15	Sky Shuttle	5	701	11,88

Tabla 11.25: Comparación de Tarifas por Kilómetro de Diferentes Operadoras de Helicópteros

Este análisis ha permitido validar que la tarifa establecida de 2.86 €/km se encuentra bien posicionada dentro del rango de tarifas presentadas en la tabla. Esto indica que nuestra estructura de precios es competitiva y adecuada para el mercado de transporte aéreo con aeronaves eVTOL. La comparación demuestra que nuestra tarifa no solo es viable, sino que también está alineada con las prácticas del mercado actual, lo que facilita la aceptación por parte de los consumidores y la sostenibilidad financiera a largo plazo.

Además, es importante destacar que ha sido calculada considerando un escenario conservador en el que las rutas requieren tiempos de carga completa de las baterías. Sin embargo, en rutas de corto radio que no requieran tiempos de carga completa, el ratio de tarifa por kilómetro podría ser aún más favorable. Esto se debe a la reducción de los costes operativos asociados a la carga de baterías y el aumento de la eficiencia operativa en trayectos más cortos. Al adoptar este enfoque conservador en nuestro estudio, hemos asegurado que nuestras proyecciones sean realistas y sostenibles, incluso en los escenarios más exigentes.

Como conclusión, el estudio realizado de un servicio de taxi aéreo que opere una variedad de rutas ha demostrado ser, no solo competitivo en el mercado actual de transporte aéreo, sino que también proporciona una base sólida para la expansión futura en base a la demanda estimada, la cual atenderá a la disponibilidad de la implementación de dicha tecnología en el espacio aéreo. La capacidad de ofrecer un servicio eficiente y económicamente viable en rutas tanto de corto como de largo alcance permitiría establecer un posicionamiento favorable para capturar una cuota de mercado significativa y lograr la sostenibilidad financiera a largo plazo.

## 11.7. Proyecciones Financieras.

Concepto	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
<b>Ingresos Totales (€)</b>	6.115.734	7.012.139	8.007.120	9.078.370	10.545.519	12.447.474	12.598.455	14.434.860	14.557.929	14.756.045
<b>Costes de Ventas (€)</b>	(2.269.975)	(2.709.391)	(3.199.898)	(3.889.908)	(4.172.375)	(4.460.628)	(4.528.020)	(4.817.939)	(4.884.506)	(4.997.955)
- Tarifas Aeroportuarias (€)	(1.317.559)	(1.694.168)	(2.128.781)	(2.629.738)	(2.911.020)	(3.208.520)	(3.323.466)	(3.441.725)	(3.563.358)	(3.688.426)
- Costes Recarga (€)	(55.388)	(60.135)	(64.883)	(83.556)	(89.253)	(94.950)	(94.950)	(110.775)	(110.775)	(110.775)
- Pilotos (€)	(546.000)	(562.380)	(579.251)	(708.498)	(729.753)	(751.646)	(774.195)	(992.725)	(1.022.507)	(1.053.182)
- Comercial & Marketing (€)	(351.029)	(392.708)	(426.984)	(468.116)	(442.349)	(405.512)	(335.409)	(272.714)	(187.866)	(145.572)
<b>Costes de Explotación (€)</b>	(1.747.000)	(1.734.650)	(1.722.920)	(2.054.124)	(2.041.416)	(2.029.344)	(2.017.872)	(2.341.472)	(2.329.404)	(2.317.938)
- Salariales (€)	(750.000)	(750.000)	(750.000)	(900.000)	(900.000)	(900.000)	(900.000)	(1.050.000)	(1.050.000)	(1.050.000)
- Mantenimiento (€)	(750.000)	(750.000)	(750.000)	(900.000)	(900.000)	(900.000)	(900.000)	(1.050.000)	(1.050.000)	(1.050.000)
- Coste Baterías (€)	(247.000)	(234.650)	(222.920)	(254.124)	(241.416)	(229.344)	(217.872)	(241.472)	(229.404)	(217.938)
<b>EBITDA (€)</b>	2.098.758	2.568.098	3.084.302	3.134.338	4.331.727	5.957.502	6.052.563	7.275.449	7.344.019	7.440.152
<b>Amortizaciones (€)</b>	(2.300.000)	(2.300.000)	(2.300.000)	(2.802.604)	(2.802.604)	(2.802.604)	(2.802.604)	(3.368.290)	(3.368.290)	(3.368.290)
<b>EBIT (€)</b>	(201.242)	268.098	784.302	331.734	1.529.123	3.154.898	3.249.959	3.907.159	3.975.729	4.071.862
<b>Gastos Financieros (€)</b>	(1.840.000)	(1.840.000)	(1.840.000)	(2.242.083)	(2.242.083)	(2.242.083)	(2.242.083)	(2.694.631)	(2.694.631)	(2.694.631)
<b>EBT (€)</b>	(2.041.242)	(1.571.902)	(1.055.698)	(1.910.349)	(712.960)	912.815	1.007.876	1.212.528	1.281.098	1.377.231
<b>Impuestos (€)</b>	0	0	0	0	0	(228.204)	(251.969)	(303.132)	(320.274)	(344.308)
<b>Resultado Neto (€)</b>	(2.041.242)	(1.571.902)	(1.055.698)	(1.910.349)	(712.960)	684.611	755.907	909.396	960.823	1.032.923
<b>Resultado Neto vs Ingresos (%)</b>	(33,37%)	(22,41%)	(13,19%)	(21,05%)	(6,76%)	5,50%	6,00%	6,30%	6,60%	7,00%

Tabla 11.26: Cuentas de pérdidas y ganancias proyectadas (2025-2034).

Concepto	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
<b>Activos</b>										
<b>Corrientes</b>										
- Efectivo y Equivalentes (€)	1.000.000	1.200.000	1.400.000	1.600.000	1.800.000	2.000.000	2.200.000	2.400.000	2.600.000	2.800.000
- Cuentas por Cobrar (€)	500.000	550.000	600.000	650.000	700.000	750.000	800.000	850.000	900.000	950.000
- Inventarios (€)	200.000	220.000	240.000	260.000	280.000	300.000	320.000	340.000	360.000	380.000
<b>Total Activos Corrientes</b>	1.700.000	1.970.000	2.240.000	2.510.000	2.780.000	3.050.000	3.320.000	3.590.000	3.860.000	4.130.000
<b>Activos No Corrientes</b>										
- Propiedad, Planta y Equipo (€)	10.000.000	10.500.000	11.000.000	11.500.000	12.000.000	12.500.000	13.000.000	13.500.000	14.000.000	14.500.000
- Inversiones a Largo Plazo (€)	500.000	550.000	600.000	650.000	700.000	750.000	800.000	850.000	900.000	950.000
<b>Total Activos No Corrientes</b>	10.500.000	11.050.000	11.600.000	12.150.000	12.700.000	13.250.000	13.800.000	14.350.000	14.900.000	15.450.000
<b>Total Activos</b>	12.200.000	13.020.000	13.840.000	14.660.000	15.480.000	16.300.000	17.120.000	17.940.000	18.760.000	19.580.000
<b>Pasivos</b>										
<b>Corrientes</b>										
- Cuentas por Pagar (€)	800.000	850.000	900.000	950.000	1.000.000	1.050.000	1.100.000	1.150.000	1.200.000	1.250.000
- Deudas a Corto Plazo (€)	500.000	550.000	600.000	650.000	700.000	750.000	800.000	850.000	900.000	950.000
<b>Total Pasivos Corrientes</b>	1.300.000	1.400.000	1.500.000	1.600.000	1.700.000	1.800.000	1.900.000	2.000.000	2.100.000	2.200.000
<b>Pasivos No Corrientes</b>										
- Préstamos a Largo Plazo (€)	8.000.000	8.500.000	9.000.000	9.500.000	10.000.000	10.500.000	11.000.000	11.500.000	12.000.000	12.500.000
<b>Total Pasivos No Corrientes</b>	8.000.000	8.500.000	9.000.000	9.500.000	10.000.000	10.500.000	11.000.000	11.500.000	12.000.000	12.500.000
<b>Total Pasivos</b>	9.300.000	9.900.000	10.500.000	11.100.000	11.700.000	12.300.000	12.900.000	13.500.000	14.100.000	14.700.000
<b>Patrimonio Neto</b>										
- Capital Social (€)	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000
- Reservas (€)	1.000.000	1.200.000	1.400.000	1.600.000	1.800.000	2.000.000	2.200.000	2.400.000	2.600.000	2.800.000
- Resultados Retenidos (€)	900.000	920.000	940.000	960.000	980.000	1.000.000	1.020.000	1.040.000	1.060.000	1.080.000
<b>Total Patrimonio Neto</b>	2.900.000	3.120.000	3.340.000	3.560.000	3.780.000	4.000.000	4.220.000	4.440.000	4.660.000	4.880.000
<b>Total Pasivos y Patrimonio Neto</b>	12.200.000	13.020.000	13.840.000	14.660.000	15.480.000	16.300.000	17.120.000	17.940.000	18.760.000	19.580.000

Tabla 11.27: Hoja de balance de la compañía (2025-2034).





# Capítulo 12

## Pliego de Condiciones

### 12.1. Objeto.

El presente pliego de condiciones abarca todos los recursos y aspectos necesarios para llevar a cabo el desarrollo del proyecto de implementación de un vertipuerto para operaciones eVTOL en Valencia. Este documento tiene como objetivo asegurar que el proyecto y la memoria se desarrollen de manera óptima, considerando un enfoque integral que incluye el estudio de viabilidad del caso de negocio, dimensionamiento de la infraestructura, y el entorno de trabajo. En esta sección se detallan todos los factores críticos de trabajo a considerar durante la realización del proyecto planteado.

### 12.2. Condiciones de ejecución.

#### 12.2.1. Descripción.

Las condiciones de ejecución del proyecto abarcan diversos aspectos críticos relacionados con el entorno en el que ha sido desarrollado el proyecto. Es fundamental adherirse a lo estipulado en el Real Decreto 488/1997, que establece las disposiciones mínimas de salud y seguridad necesarias para prevenir riesgos laborales y mitigar posibles riesgos de salud asociados con la actividad principal del proyecto, que incluye el trabajo prolongado con pantallas de visualización. Al seguir estas normativas, se garantiza un entorno de trabajo seguro y saludable para todos los profesionales involucrados, promoviendo prácticas que eviten la fatiga visual y otros problemas de salud derivados del uso intensivo de equipos informáticos.

#### 12.2.2. Supervisión.

La correcta realización del proyecto estará bajo la supervisión constante de los profesores cotutores responsables. Estos supervisores deben poseer amplios conocimientos y experiencia en áreas clave relacionadas con el proyecto. En concreto, al menos uno de los supervisores debe tener una profunda comprensión de las metodologías requeridas para llevar a cabo el diseño y dimensionamiento de infraestructuras aeroportuarias, así como de aspectos de urbanismo y planificación de proyectos. Además, es imprescindible que uno de los cotutores tenga conocimientos especializados en el estado de la tecnología eVTOL y el potencial de los servicios de taxi aéreo, comprendiendo las últimas tendencias y desarrollos en este campo emergente. La combinación de estas áreas de especialización permite asegurar una supervisión adecuada y competente durante todas las fases del proyecto, desde la concepción hasta su implementación.

### 12.2.3. Conocimientos requeridos.

El ingeniero responsable del proyecto debe contar con un conjunto de conocimientos específicos que le permitan abordar los desafíos técnicos y operativos del desarrollo del vertipuerto. Estos conocimientos incluyen, pero no se limitan a, el diseño y dimensionamiento de infraestructuras aeroportuarias, urbanismo, y las tecnologías eVTOL. Además, el ingeniero debe tener habilidades complementarias en áreas financieras y de explotación aérea para contribuir al estudio de viabilidad económica del proyecto. La capacidad del ingeniero para interpretar datos y tomar decisiones informadas ante obstáculos técnicos o regulatorios es esencial para el éxito del proyecto. Este perfil multidisciplinario del ingeniero garantiza una visión holística y detallada que abarca todos los aspectos del desarrollo del vertipuerto.

## 12.3. Condiciones de los materiales.

### 12.3.1. Descripción.

El desarrollo del proyecto requiere una serie de materiales específicos que son cruciales para la realización de las materias descritas a lo largo del proyecto. Estos materiales incluyen tanto componentes físicos como software especializado. A continuación, se detallan los principales recursos materiales necesarios para la ejecución del proyecto:

### 12.3.2. Elementos software.

Para el desarrollo del proyecto se necesitan los siguientes programas de software:

- **Microsoft Office:** Principalmente Microsoft Excel, utilizado para la redacción de documentos, creación de tablas, figuras de visualización, manejo de datos en hojas de cálculo y realización de previsiones financieras.
- **Overleaf/LaTeX:** Utilizado para la elaboración de documentos técnicos y académicos.
- **ArcGIS:** Software de cartografía y análisis espacial utilizado para la creación y gestión de mapas y datos geográficos.
- **Google Earth:** Sistema de información geográfica utilizado para la visualización y análisis de terrenos y ubicaciones geoespaciales.
- **Google Chrome:** Navegador web empleado para la búsqueda de información y bases de datos especializadas.
- **Autodesk AutoCAD:** Herramienta esencial para el diseño en 2D de la infraestructura del vertipuerto, incluyendo superficies de movimiento y planos detallados del vertipuerto.

### 12.3.3. Hardware

El hardware necesario para ejecutar el software mencionado debe cumplir con ciertos requisitos mínimos para asegurar un rendimiento óptimo. A continuación se detallan las especificaciones de hardware recomendadas:

- **Sistema Operativo:** Versión de 64 bits de Microsoft Windows 10 o superior.
- **Procesador:** Básico: no se admiten procesadores ARM de 2,5 - 2,9 GHz (base). Recomendado: procesador de 3 GHz o más (base), 4 GHz o más (turbo).
- **Memoria:** Básico: 8 GB. Recomendado: 32 GB.
- **Resolución de Pantalla:** Pantallas convencionales: 1920 x 1080 con color verdadero.

Pantallas 4K y de alta resolución: Resoluciones de hasta 3840 x 2160 (con tarjeta gráfica recomendada).

- **Tarjeta Gráfica:** Básico: GPU de 2 GB con un ancho de banda de 29 GB/s y compatible con DirectX 11. Recomendado: GPU de 8 GB con un ancho de banda de 106 GB/s y compatible con DirectX 12.
- **Espacio en Disco:** 10,0 GB (unidad SSD recomendada).
- **Red:** Compatible con Autodesk Network License Manager para Windows.
- **.NET Framework:** Versión 4.8 o posterior.

El ordenador empleado en el proyecto es un Lenovo Ideapad 530S-14IKB, el cual cumple con todas las especificaciones necesarias para ejecutar el software requerido.

#### 12.3.4. Material adicional.

Además del software y hardware, el proyecto se apoyará en una serie de materiales adicionales que resultan esenciales para el desarrollo de la memoria. Estos incluyen documentos oficiales, reportes académicos y científicos, así como datos estadísticos de diversas fuentes. Entre los materiales adicionales se incluyen:

- **Visor Cartográfico de la Generalitat:** Herramienta utilizada para obtener información geoespacial detallada.
- **Consultorio Estadístico del INE:** Fuente de datos estadísticos relevantes para el análisis demográfico y económico del entorno del proyecto.
- **Consultorio Estadístico de AENA:** Fuente de datos sobre el tráfico aéreo y otros parámetros relevantes para la planificación aeroportuaria.
- **Consultorio Estadístico de AEMET:** Fuente de datos meteorológicos y climáticos necesarios para evaluar las condiciones ambientales del proyecto.
- **TomTom Traffic Stats:** Datos de tráfico utilizados para analizar la congestión y planificar rutas.
- **Reportes Oficiales y Trabajos Académicos:** Documentación adicional que proporciona información relevante como el Plan Director del Aeropuerto de Valencia, o contexto científico sobre tecnologías eVTOL y movilidad aérea urbana.



# Capítulo 13

## Presupuesto

El siguiente desglose de presupuesto refleja el valor económico que supondría la realización del proyecto para un ingeniero recién titulado. Se consideran gastos de personal contratado, emplazamiento y equipo. La duración estimada del proyecto es de 10 meses al ritmo estipulado, incluyendo todas las fases comprendidas en la memoria.

### 13.1. Coste del Material

En este apartado se calculan de manera aproximada los costes de hardware y software utilizados para el desarrollo del proyecto. Se asume que se han comprado las licencias de todos los programas y que ninguno ha sido proporcionado gratuitamente por la universidad ni por la condición de estudiante. Se consideran el coste únicamente en los períodos amortizados durante el proyecto. Se muestran en la Tabla 13.1.

Material	Coste total (€)	Amortización (meses)	Amortizado (meses)	Total (€)
Ordenador Lenovo	798,85	60	10	133,14
Licencia Office 365	69,00	12	10	57,50
Licencia Autodesk	2.277,60	12	10	1.898,00
Licencia ArcGIS	5.391,00	12	10	4.492,50
Google Earth/Chrome	0,00	12	10	0,00
TomTom Traffic	20,00/mes	10	10	200,00
<b>Subtotal</b>				<b>6.781,14</b>

Tabla 13.1: Coste de material

### 13.2. Costes de Oficina

Son los costes relacionados con el espacio físico en que se desarrolla el proyecto. Este proyecto se ha realizado en una oficina alquilada con una tarifa estipulada en 150 € mensuales, tal y como se muestra en la Tabla 13.2, incluyendo los gastos de suministros asociados.

Recurso	Coste mensual (€)	Amortización (meses)	Importe total (€)
Alquiler Oficina	150,00	10	1.500,00
<b>Subtotal</b>			<b>1.500,00</b>

Tabla 13.2: Costes de oficina

### 13.3. Costes de Personal

Se estima un trabajo de 10 horas semanales por parte del ingeniero titulado y un trabajo de 15 horas totales por parte de cada uno de los tutores. Con estas estimaciones se calcula el coste horario de cada uno de los integrantes del proyecto. Se muestra en la Tabla 13.3.

Recurso	Coste por hora (€/h)	Horas empleadas	Importe total (€)
Ingeniero aeronáutico	24,00	400	9.600,00
Prof. Ingeniero Doctor	30,00	15	450,00
Prof. Ingeniero Doctor	30,00	15	450,00
<b>Subtotal</b>		<b>10.500,00</b>	

Tabla 13.3: Costes de personal

### 13.4. Presupuesto Total

Se suman los resultados de los tres apartados anteriores y se les aplica un 21 % de IVA como establece la ley en España. Se muestra en la Tabla 13.4.

Concepto	Subtotal (€)
Material	6.781,14
Oficina	1.500,00
Personal	10.500,00
<b>Total sin IVA</b>	<b>18.781,14</b>
IVA (21 %)	3.944,04
<b>Total proyecto</b>	<b>22.725,18</b>

Tabla 13.4: Coste total del proyecto

# Capítulo 14

## Objetivos de Desarrollo Sostenible

El proyecto de implementación de un vertipuerto para operaciones eVTOL en Valencia está estrechamente relacionado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una iniciativa global adoptada por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015 como un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas disfruten de paz y prosperidad para 2030. Estos 17 objetivos están integrados, es decir, reconocen que la acción en un área afectará los resultados en otras, y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad económica, social y ambiental.



Figura 14.1: Tabla de los objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: [ONU].

En particular, el presente proyecto se alinea con los ODS 8, 9 y 11, explicados a continuación:

### 14.1. ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico

El ODS 8 busca promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos. El proyecto del vertipuerto contribuye a este objetivo de las siguientes maneras:

- **Creación de Empleo:** La implementación y operación del vertipuerto generarán nuevos puestos de trabajo tanto directos como indirectos. Esto incluye empleos en la construcción, operación, mantenimiento, y servicios asociados al vertipuerto.
- **Desarrollo Económico Local:** Al mejorar la conectividad y atraer nuevas oportunidades de negocio y turismo, el vertipuerto impulsará el desarrollo económico de la región. La infraestructura moderna y eficiente atraerá inversiones y fomentará la innovación.

- **Fomento de Nuevas Habilidades:** La operación de tecnologías eVTOL y la gestión de vertipuertos requieren habilidades especializadas. El proyecto ofrecerá capacitación y desarrollo profesional en áreas emergentes de la movilidad aérea y la tecnología sostenible.

## 14.2. ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

El ODS 9 se centra en construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación. El proyecto del vertipuerto en Valencia aborda este objetivo de las siguientes maneras:

- **Infraestructura Innovadora:** El vertipuerto representa una infraestructura moderna y avanzada que apoya el desarrollo de la movilidad aérea urbana. La infraestructura incluye áreas de despegue y aterrizaje, estaciones de recarga eléctrica, y sistemas de gestión de tráfico aéreo avanzados.
- **Promoción de la Innovación:** La implementación de vehículos eVTOL fomenta la innovación en el sector de la aviación y el transporte. El vertipuerto servirá como un hub para el desarrollo y la prueba de nuevas tecnologías en movilidad aérea.
- **Mejora de la Eficiencia Operacional:** La infraestructura del vertipuerto está diseñada para optimizar las operaciones aéreas, reduciendo tiempos de espera y mejorando la coordinación del tráfico aéreo. Esto contribuye a una mayor eficiencia y seguridad en el espacio aéreo urbano.

## 14.3. ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

El ODS 11 se centra en hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. El proyecto del vertipuerto en Valencia contribuye a este objetivo de las siguientes maneras:

- **Movilidad Urbana Sostenible:** La implementación de servicios de taxi aéreo eVTOL ofrece una solución innovadora para la movilidad urbana, reduciendo la congestión del tráfico terrestre y proporcionando una opción de transporte rápida y sostenible.
- **Reducción de la Contaminación:** Al utilizar vehículos eléctricos para el transporte aéreo, se reduce la contaminación acústica y atmosférica en las áreas urbanas, mejorando la calidad de vida de los residentes.
- **Accesibilidad y Conectividad:** El vertipuerto mejora la conectividad entre diferentes partes de la ciudad y con otras ciudades cercanas, promoviendo un desarrollo urbano más equilibrado y accesible.

De esta forma, se concluye que la implementación de un vertipuerto en la ciudad de Valencia así como el desarrollo de un servicio de taxi aéreo, no solo impulsa la movilidad eléctrica y sostenible, sino que también contribuye de manera significativa a los esfuerzos globales por alcanzar los ODS 8, 9 y 11. A través de la creación de empleo, la promoción de la innovación, y la mejora de la movilidad urbana, el proyecto se alinea con la visión de un futuro más sostenible.



# Capítulo 15

## Conclusiones

El presente trabajo ha realizado un exhaustivo estudio sobre la viabilidad y justificación de un vertipuerto en Valencia, así como la implementación de una aerolínea que opere el servicio de taxi aéreo de manera sostenible y rentable. El proyecto se ha estructurado en dos áreas principales: el dimensionamiento de la infraestructura y la definición del modelo de negocio del operador, abarcando aspectos técnicos, operativos y económicos para establecer un sistema de transporte innovador en entornos urbanos.

Primero, el análisis de la movilidad en Valencia permitió identificar las problemáticas actuales y las tendencias futuras de congestión, evidenciando la necesidad de alternativas en el desplazamiento urbano. Este análisis resaltó el importante rol de la UAM, apoyada en una red de vertipuertos estratégicamente distribuidos para gestionar eficientemente el tráfico de pasajeros.

Identificada la problemática, se procedió a calcular y estimar la demanda potencial de este nuevo concepto de movilidad. Se establecieron diferentes tipos de operación, considerando los modos de transporte y radios de operación en Valencia. A través del estudio de cifras recientes de movilidad, turismo, capacidad de las infraestructuras existentes y la tasa de adopción de nuevos medios de transporte, se determinó una demanda objetivo y sus previsiones de crecimiento futuro.

Con esta planificación, y considerando la aeronave más restrictiva del estado del arte, se dimensionó la infraestructura para satisfacer esta demanda, siguiendo regulaciones y normativas de las autoridades aeronáuticas europeas. Se evaluaron los terrenos disponibles en el entorno urbano y se diseñaron las superficies de movimientos de aeronaves, instalaciones aeroportuarias y auxiliares, así como las servidumbres necesarias para garantizar su operación segura y eficiente. Este proceso incluyó un estudio detallado de las condiciones generales del emplazamiento final.

Finalizado el diseño del vertipuerto, se llevó a cabo un estudio de viabilidad para un modelo de negocio que proporcionase el servicio de taxi aéreo atendiendo a la demanda estimada y operando en la infraestructura diseñada. Este estudio abarcó los costes asociados a la actividad, incluyendo necesidades técnicas, operativas y el dimensionamiento del equipo. A través del desarrollo de hipótesis basadas en la operativa de aerolíneas de referencia para alcanzar una rentabilidad objetivo, el análisis mostró que la estrategia propuesta resulta viable y competitiva respecto a otros medios de transporte, en términos de precio por pasajero y coste por kilómetro, reforzando su atractivo y potencial éxito en el mercado.

En conclusión, se han alcanzado todos los objetivos planteados al inicio del proyecto. Se ha identificado la ubicación óptima para el vertipuerto, dimensionado adecuadamente sus instalaciones, seleccionado la aeronave más adecuada, establecido una estructura de costes detallada y diseñado un modelo de negocio viable. La tarifa propuesta es competitiva y sostenible, ofreciendo una solución innovadora para la movilidad urbana en Valencia. Este proyecto no solo mejora el transporte, sino que también reduce emisiones y mejora la calidad de vida en la ciudad, representando una decisión innovadora y sostenible para la movilidad urbana futura.



# Capítulo 16

## Líneas futuras del proyecto.

El presente estudio establece una base sólida para la implementación de un vertipuerto y un servicio de taxi aéreo en Valencia. Sin embargo, hay varias áreas de investigación y desarrollo que se deben abordar en fases futuras para garantizar el éxito y la sostenibilidad del proyecto.

En primer lugar, se deberá realizar un análisis exhaustivo de la movilidad urbana en Valencia mediante encuestas detalladas para evaluar la disposición de los ciudadanos y turistas a utilizar el servicio de taxi aéreo. Estos estudios permitirán comprender las preferencias, expectativas y barreras potenciales para la adopción del nuevo medio de transporte. Además, es crucial desarrollar modelos avanzados de simulación del tráfico que integren datos de movilidad aérea y terrestre, permitiendo prever el impacto del servicio de taxi aéreo en la reducción de la congestión y la optimización del flujo de tráfico.

La estimación de la demanda potencial requiere de estudios de mercado más detallados, que incluyan un análisis granular de los segmentos de clientes potenciales, sus comportamientos de viaje y las tarifas que están dispuestos a pagar. Además, es necesario desarrollar proyecciones de demanda a largo plazo que consideren diferentes escenarios económicos, tecnológicos y demográficos, incluyendo la evolución de la movilidad urbana y las tendencias de urbanización.

En cuanto al dimensionamiento de la infraestructura, es fundamental realizar estudios detallados del impacto acústico que la operación de eVTOL puede tener en las áreas urbanas circundantes, implementando estrategias para mitigar el impacto sonoro. Asimismo, se deben llevar a cabo estudios de impacto medioambiental que aborden no solo la huella de carbono y el consumo de recursos, sino también la afectación a especies animales, la proximidad a zonas de impacto medioambiental y la interferencia con áreas protegidas tanto en el emplazamiento del vertipuerto como en las rutas de aproximación y despegue. Evaluar la necesidad de instalaciones radioeléctricas para garantizar la comunicación y la navegación segura de los eVTOL es otro aspecto clave, así como continuar refinando el diseño del vertipuerto para mejorar la eficiencia operativa y la integración con otros modos de transporte.

En la fase de evaluación económica y desarrollo del modelo de negocio, se deben realizar análisis de sensibilidad para evaluar cómo las variaciones en los costes operativos, las tarifas y la demanda afectan la rentabilidad del proyecto. Esto ayudará a desarrollar estrategias de mitigación de riesgos financieros. También es necesario explorar diversas opciones de financiación, incluyendo asociaciones público-privadas, subvenciones gubernamentales y financiamiento a través de inversores privados. Además, investigar y adoptar tecnologías sostenibles y eficientes energéticamente puede reducir los costes operativos y mejorar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

La validación y conclusiones del proyecto deben incluir la implementación de programas piloto para probar el servicio de taxi aéreo en un entorno controlado antes de su despliegue completo. Estos programas proporcionarán datos valiosos sobre la operatividad, la aceptación por parte de los usuarios y los desafíos logísticos. Establecer un marco para la revisión continua y la actualización del proyecto asegurará que se adapte a los cambios en la tecnología, las regulaciones y las necesidades del mercado.

Estas líneas futuras del proyecto garantizarán que la implementación del vertipuerto y el servicio de taxi aéreo no solo sean viables y rentables, sino también sostenibles y adaptados a las necesidades de la ciudad de Valencia, contribuyendo significativamente a la mejora del transporte urbano y la calidad de vida en la ciudad.

# Bibliografía

- AEMET. Aemet opendata. <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/productosAEMET?> (Accessed on 07/02/2024).
- AEMET. Rescumen climático anual en la comunidad valenciana. <https://static.lasprovincias.es/www/multimedia/202212/21/media/comunitat-tiempo.pdf>, 2022. (Accessed on 07/03/2024).
- AENA. Pdvalencia. [https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/pdf/2F5BDEFB-38FD-40B1-A929-99A7975034D4/99039/3Evoprevidemanda.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/pdf/2F5BDEFB-38FD-40B1-A929-99A7975034D4/99039/3Evoprevidemanda.pdf), 2010. (Accessed on 07/02/2024).
- AENA. Consultas personalizadas. <https://www.aena.es/es/estadisticas/consultas-personalizadas.html>, 2022. (Accessed on 07/02/2024).
- Joby Aviation. Joby aviation — joby. <https://www.jobyaviation.com/>. (Accessed on 06/23/2024).
- BETA. Charging - beta. <https://www.beta.team/charge/>, 2023. (Accessed on 07/03/2024).
- Adam Cohen, Susan Shaheen, and Emily Farrar. Urban air mobility: History, ecosystem, market potential, and challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, PP:1–14, 06 2021. doi: 10.1109/TITS.2021.3082767.
- Fred D. Davis. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3):319–340, 1989. ISSN 02767783, 21629730. URL <http://www.jstor.org/stable/249008>.
- Dufour. Aero3. <https://www.dufour.aero/aero3>. (Accessed on 06/23/2024).
- Google Earth. Google earth. <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>. (Accessed on 07/02/2024).
- EASA. Pts-vpt-dsn (5).pdf. [file:///C:/Users/jllamazares/Downloads/PTS-VPT-DSN%20\(5\).pdf](file:///C:/Users/jllamazares/Downloads/PTS-VPT-DSN%20(5).pdf), 2022. (Accessed on 07/03/2024).
- eHang. Ehang — uam - passenger autonomous aerial vehicle (aav). <https://www.ehang.com/ehangaav/>. (Accessed on 06/23/2024).
- eVTOLnews. Ehang eh216-s (production model). <https://evtol.news/ehang-216/>, a. (Accessed on 06/23/2024).
- eVTOLnews. Lilium jet (7-seater). <https://evtol.news/lilium-gmbh-lilium-jet-7-seater>, b. (Accessed on 06/23/2024).
- eVTOLnews. Volocopter 2x (prototype). <https://evtol.news/volocopter-2x/>, c. (Accessed on 06/23/2024).
- Flightradar24. Valencia airport (vlc/levc) — arrivals, departures & routes — flightradar24. <https://www.flightradar24.com/data/airports/vlc>, 2023. (Accessed on 07/02/2024).

- Patricia C. Glaab, F. Wieland, M. Santos, Rohit Sharma, Ralph Tamburro, and Paul U. Lee. Simulating fleet noise for notional uam vehicles and operations in new york. *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–10, 2019. doi: 10.1109/DASC43569.2019.9081670.
- J. Holden and N. Goel. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation. [https://evt01.news/\\_media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf](https://evt01.news/_media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf), 2016. (Accessed on 06/23/2024).
- Andrii Humennyi, Lillia Buival, and Zeyan Zheng. Research on scientific directions for flying cars at the preliminary design stage. *Computation*, 11:58, 03 2023. doi: 10.3390/computation11030058.
- IAG. Informe y cuentas anuales 2023. <file:///C:/Users/jllamazares/Downloads/iag-informe-y-cuentas-anuales-2023.pdf>, 2023. (Accessed on 07/11/2024).
- IATA. Air development reference manual. [file:///C:/Users/jllamazares/Downloads/pdfcoffee.com\\_airport-development-reference-manualpdf-pdf-free.pdf](file:///C:/Users/jllamazares/Downloads/pdfcoffee.com_airport-development-reference-manualpdf-pdf-free.pdf), 2004. (Accessed on 07/06/2024).
- IGN. Cálculo de la declinación magnética en la península y baleares - instituto geográfico nacional. <https://www.ign.es/web/gmt-declinacion-magnetica>. (Accessed on 07/02/2024).
- IGV. Visor cartogràfic de la generalitat. <https://visor.gva.es/visor/>. (Accessed on 07/02/2024).
- INE. Valencia/valència: Población por municipios y sexo.(2903). <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2903&L=0>. (Accessed on 07/02/2024).
- IVE. Hostelería y turismo - portal estadístico de la generalitat valenciana - generalitat valenciana. <https://pegv.gva.es/es/temas/servicios/0turismo>, a. (Accessed on 07/02/2024).
- IVE. Indicadores demográficos de despoblamiento de la comunitat valenciana. 2022 - portal estadístico de la generalitat valenciana - generalitat valenciana. [https://lilium.com/](https://pegv.gva.es/es/inicio/-/asset_publisher/CWK0IEKbs79H/content/indicadores-demogr%25C3%25A1ficos-de-despoblamiento-de-la-comunitat-valenciana.-2022?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_CWK0IEKbs79H_assetEntryId=370573516&_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_CWK0IEKbs79H_redirect=https%3A%2F%2Fpegv.gva.es%2Fes%2Finicio%3Fp_id%3Dcom_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_CWK0IEKbs79H%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_CWK0IEKbs79H_cur%3D0%26p_r_p_resetCur%3Dfalse%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_CWK0IEKbs79H_assetEntryId%3D370573516#:~:text=Los%20municipios%20con%20mayor%20densidad,Benet%3%BAsser%20(19.897%2C92).&text=Hay%20194%20municipios%20que%20tienen,%20%20a%3%B1os%20anteriores%20a%202022., b. (Accessed on 06/13/2023).</p>
<p>Robin Kellermann, Tobias Biehle, and L. Fischer. Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. <i>Transportation Research Interdisciplinary Perspectives</i>, 2020. doi: 10.1016/j.trip.2019.100088.</p>
<p>Lilium. Lilium air mobility - lilium. <a href=). (Accessed on 06/23/2024).
- NASA. Nasa advanced air mobility (aam) urban air mobility (uam) and grand challenge aiaa. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190026695/downloads/20190026695.pdf>, 2020. (Accessed on 06/22/2024).

- OACI. Microsoft word - anx.14.vol.02.4th edition.incl.amdt.6.alltext.en.docx. <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/10/ICA0-Annex-14-Aerodromes-Vol-II-Heliports.pdf>, 2013. (Accessed on 07/02/2024).
- ONU. Objetivos y metas de desarrollo sostenible - desarrollo sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. (Accessed on 07/24/2024).
- Jessie Mooberry Pavan Yedavalli. An assessment of public perception of urban air mobility (uam). <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2022-07/Airbus-UTM-public-perception-study%20-urban-air-mobility.pdf>, 2022 . (Accessed on 06/23/2024).
- C. Reiche, R. Goyal, A. Cohen, J. Serrao, S. Kimmel, C. Fernando, and S. Shaheen. Urban air mobility market study. Technical report, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2018. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.7922/G2ZS2TRG>.
- Raoul Rothfeld, Milos Balac, and Constantinos Antoniou. Modelling and evaluating urban air mobility – an early research approach. *Transportation Research Procedia*, 41:41–44, 2019. ISSN 2352-1465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.09.007>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146519304181>. Urban Mobility – Shaping the Future Together mobil.TUM 2018 – International Scientific Conference on Mobility and Transport Conference Proceedings.
- Giulia Casmiro Scarmagnani. Unmanned aerial vehicles. *Computational Thinking for Problem Solving and Managerial Mindset Training*, 2021. doi: 10.4018/978-1-7998-7126-2.ch012.
- Debjyoti Sengupta and Sajal K. Das. Urban air mobility: Vision, challenges and opportunities. *2023 IEEE 24th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pages 1–6, 2023. doi: 10.1109/HPSR57248.2023.10148014.
- A. Straubinger, R. Rothfeld, M. Shamiyeh, Kai-Daniel Büchter, J. Kaiser, and K. Plötner. An overview of current research and developments in urban air mobility – setting the scene for uam introduction. *Journal of Air Transport Management*, 87:101852, 2020. doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101852.
- TomTom. Tomtom move. <https://move.tomtom.com/dashboard>. (Accessed on 07/02/2024).
- TomTom. Tomtom move. <https://move.tomtom.com/login?redirect=https%3A%2F%2Fmove.tomtom.com%2Fdashboard>, 2023a. (Accessed on 06/23/2024).
- TomTom. Traffic data & traffic stats — tomtom. <https://www.tomtom.com/products/traffic-stats/>, 2023b. (Accessed on 07/02/2024).
- Turismo. Desglose estadísticas anuales 2019. <https://denia.net/estadisticas>. (Accessed on 07/02/2024).
- Osita Ugwueze, Thomas Statheros, Nadjim Horri, Michael A. Bromfield, and Jules Simo. An efficient and robust sizing method for evtol aircraft configurations in conceptual design. *Aerospace*, 10(3), 2023. ISSN 2226-4310. doi: 10.3390/aerospace10030311. URL <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/3/311>.
- Fundación Visit Valencia. Folleto\_estadisticas\_2022.pdf. [https://fundacion.visitvalencia.com/sites/default/files/media/downloadable-file/files/Folleto\\_Estadisticas\\_2022.pdf](https://fundacion.visitvalencia.com/sites/default/files/media/downloadable-file/files/Folleto_Estadisticas_2022.pdf), 2022. (Accessed on 06/23/2024).
- Peter D. Vascik and R. John Hansman. Evaluating the interoperability of urban air mobility systems and airports. *Transportation Research Record*, 2675(6):1–14, 2021. doi: 10.1177/0361198121991501. URL <https://doi.org/10.1177/0361198121991501>.

Vertical. Meet the vx4 · vertical aerospace. <https://vertical-aerospace.com/meet-the-vx4/>. (Accessed on 06/23/2024).

Volocopter. Urban air mobility pioneer volocopter. <https://www.volocopter.com/en/urban-air-mobility>. (Accessed on 06/23/2024).

Wisk. Our self-flying air taxi. <https://wisk.aero/aircraft/>. (Accessed on 06/23/2024).