



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

**Modelo de Negocio de Movilidad Aérea
Urbana: Implementación de una Red de
Vertipuertos y Rutas de eVTOLs en
Madrid mediante Colaboración Público-
Privada**

César Solla González



Título: Modelo de Negocio de Movilidad Aérea Urbana: Implementación de una Red de Vertipuertos y Rutas de eVTOLs en Madrid mediante Colaboración Público-Privada

Autor: César Solla González

Tutor: Ernesto de la Fuente Cantarino

Titulación: Máster habilitante en Ingeniería Aeronáutica

Curso: 2024 - 2025



Resumen

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la viabilidad de un modelo de negocio de Movilidad Aérea Urbana (UAM) en la ciudad de Madrid, basado en una red de vertipuertos y rutas operadas por eVTOLs eléctricos. La propuesta incluye un análisis exhaustivo de la viabilidad económica, los requisitos técnicos, el marco regulatorio y los esquemas de colaboración público-privada. Se identifican ubicaciones estratégicas como el aeropuerto de Madrid-Barajas, la Torre Picasso y Atocha para garantizar conectividad y eficiencia operativa, con servicios enfocados en transporte de pasajeros, logística urgente y operaciones médicas.

La metodología utilizada abarca desde la revisión de literatura y análisis de tendencias globales hasta entrevistas con expertos y simulaciones financieras. Las proyecciones financieras incluyen indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), acompañadas de un plan de gestión de riesgos y fases de implementación escalonada.

Los resultados sugieren que, pese a los desafíos regulatorios, sociales y de inversión inicial, la UAM representa una oportunidad para transformar la movilidad urbana, descongestionar el tráfico y reducir las emisiones. Mediante un enfoque de mitigación de riesgos y una correcta elección del momento de entrada al mercado, se podrían lograr retornos extraordinarios sobre la inversión. La clave del éxito radica en una colaboración efectiva entre actores públicos y privados, así como en la innovación constante para mantener la competitividad y la sostenibilidad del sistema.

Índice de contenidos

Resumen.....	5
1 Introducción.....	16
1.1 Planteamiento del Problema.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Justificación y Relevancia.....	18
1.4 Metodología.....	19
2 Marco Teórico y Conceptual.....	21
2.1 Concepto de Movilidad Aérea Urbana (UAM).....	21
2.1.1 Definición y Principios Clave de la Movilidad Aérea Urbana.....	21
2.1.2 Vehículos eVTOL y su Rol en la UAM.....	21
2.1.3 U-Space y Gestión del Tráfico Aéreo.....	22
2.1.4 Relevancia de la UAM para el Futuro del Transporte Urbano.....	23
2.2 Vertipuertos: Definición y Funcionalidad.....	24
2.2.1 Ubicación y Tipologías de Vertipuertos:.....	25
2.2.2 Requisitos de Diseño y Operación:.....	26
2.2.3 Integración con el Entorno Urbano:.....	27
2.2.4 Eficiencia y Escalabilidad:.....	27
2.2.5 Estándares Internacionales y Normativas de Certificación y Operación:.....	27
2.3 Modelos de Participación Público-Privada (PPP).....	29
2.3.1 Tipos de Modelos de PPP Adaptables a Vertipuertos.....	29
2.3.2 Beneficios de las asociaciones público-privadas en la UAM:.....	30
2.3.3 Modelos y casos de colaboración exitosos:.....	30
2.4 Fundamentos de Modelos de Negocio en el Sector Aeronáutico.....	31
2.4.1 Modelos de negocio tradicionales en la aviación:.....	32
2.4.2 Nuevos modelos de negocio en la UAM:.....	32
3 Estado del Arte y Contexto Actual.....	34
3.1 Tendencias Globales en Movilidad Aérea Urbana.....	34
3.1.1 Tendencias en desarrollo de eVTOLs por países e inversión.....	34
3.1.2 Tendencias en inversión de infraestructura de vertipuertos.....	34
3.1.3 Países en adopción de eVTOLs y ejemplos reales.....	35
3.2 Regulaciones y Normativas en la UAM.....	35

3.2.1	EASA y la normativa U-Space en Europa:.....	35
3.2.2	FAA en Estados Unidos:	37
3.2.3	Mesas técnicas de trabajo y avances en regulación:	37
3.2.4	Desafíos y enfoque en sostenibilidad:	37
3.3	Fabricantes y Actores de UAM en el mercado de los eVTOLs	37
3.3.1	EHang.....	37
3.3.2	Volocopter.....	38
3.3.3	Lilium	39
3.3.4	Joby Aviation.....	40
3.3.5	Archer Aviation	41
3.3.6	Vertical Aerospace	42
3.3.7	Beta Technologies	43
3.3.8	Wisk Aero	44
3.3.9	Pipistrel	45
3.4	Resumen de los principales eVTOLs e hipótesis a utilizar	46
4	Diseño y Planificación de Vertipuertos.....	48
4.1	Identificación de Ubicaciones Potenciales	48
4.1.1	Vertipacks: Enfoque modular y escalable	48
4.2	Requisitos Técnicos y Operacionales.....	48
4.3	Planificación Flexible y Adaptativa para Vertipuertos.....	50
4.3.1	Diseño modular y Vertipacks.....	50
4.3.2	Gestión de aeronaves en tiempos de inactividad.....	51
4.3.3	Escalabilidad y Gestión de la Congestión.....	52
4.4	Evaluación del Impacto Social y Medioambiental.....	52
4.4.1	Impacto Acústico.....	52
4.4.2	Sostenibilidad y Emisiones	52
4.4.3	Integración Urbana y Aceptación Social	53
4.4.4	Beneficios Sociales y Estrategias de Mitigación.....	53
4.5	Proceso General para el Alta de un Vertipuerto.....	53
4.5.1	Estudio de viabilidad inicial y elección de ubicación	53
4.5.2	Solicitud de permisos y autorizaciones.....	54
4.5.3	Evaluación de seguridad y normativas técnicas	54
4.5.4	Evaluación medioambiental:	54

4.5.5	Construcción del vertipuerto.....	54
4.5.6	Pruebas y certificación.....	54
4.5.7	Alta oficial y operación	54
5	Desarrollo del Modelo de Negocio de Movilidad Aérea Urbana.....	56
5.1	Propuesta de Valor y Segmentación de Clientes	56
5.1.1	Red de Vertipuertos propuesta	56
5.1.2	Descripción de Rutas y Servicios Ofrecidos.....	66
5.1.3	Segmentación de Clientes.....	74
5.1.4	Propuesta de Valor para Cada Segmento	74
5.1.5	Diferenciadores Clave.....	75
5.2	Análisis de Mercado y Demanda.....	75
5.2.1	Tendencias Actuales en la Demanda de Servicios de UAM	75
5.2.2	Estudio de Mercado Local: Madrid	76
5.2.3	Factores que Impulsan o Limitan la Demanda	76
5.2.4	Proyección de la Demanda a Corto, Medio y Largo Plazo	76
5.3	Estructura de Costes.....	77
5.3.1	Costes Iniciales.....	78
5.3.2	Costes Operativos Anuales.....	84
5.3.3	Costes Totales.....	91
5.4	Estructura de Ingresos	97
5.4.1	Inversión Inicial y Estrategias de Participación Público-Privada.....	97
5.5	Ingresos Operativos.....	104
5.5.1	Ingresos de la Ruta RP01 (Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas – Torre Picasso) 105	
5.5.2	Ingresos de la Ruta RP02 (Estación de Atocha – Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas).....	107
5.5.3	Ingresos de la Ruta RT01 (Madrid Río – Ruta Turística Panorámica).....	108
5.5.4	Ingresos de la Ruta RC01 (Mercamadrid – Torre Picasso)	110
5.5.5	Ingresos de la Ruta RC02 (Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas – Torre Picasso) 112	
5.5.6	Ingresos de la Ruta RM01 (Hospital La Paz – Hospital 12 de Octubre – Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas).....	113
5.5.7	Resumen de Ingresos Anuales por Rutas.....	115
6	Análisis de Viabilidad Económica y Financiera	117

6.1	Resumen de Ingresos, Costes y Escenarios Operativos	117
6.2	Proyecciones Financieras Detalladas de las Rutas	120
6.2.1	Escenario con Pilotos.....	122
6.2.2	Escenario sin Pilotos	126
6.3	Proyecciones Financieras Detalladas de la Red	131
6.3.1	Escenario con Pilotos.....	131
6.3.2	Escenario sin Pilotos	133
6.4	Evaluación de Riesgos y Planes de Mitigación.....	134
7	Consideraciones Tecnológicas y de Innovación	138
7.1	Innovaciones en eVTOL y Sistemas de Propulsión	138
7.1.1	Avances en Propulsión Eléctrica	138
7.1.2	Diseños Aerodinámicos y Configuraciones Innovadoras.....	139
7.1.3	Automatización y Sistemas Autónomos	140
7.2	Gestión del Tráfico Aéreo Urbano (U-Space)	142
7.3	Integración con Infraestructuras Tecnológicas y de Energía.....	143
7.3.1	Infraestructuras Tecnológicas.....	143
7.3.2	Infraestructuras Energéticas	143
7.3.3	Planificación del Personal y Costos Asociados	144
7.3.4	Escalabilidad y Adaptación Futura	144
8	Plan de Implementación y Escalabilidad	145
8.1	Fases del Proyecto.....	145
8.1.1	Fase 1: Estudio de Viabilidad y Preparación (Año 1).....	145
8.1.2	Fase 2: Construcción de Infraestructura y Adquisición de eVTOLs (Años 2-3)..	145
8.1.3	Fase 3: Lanzamiento y Operación Inicial (Años 4-5).....	146
8.1.4	Fase 4: Escalabilidad y Consolidación (Años 6-10).....	146
8.1.5	Fase 5: Expansión y Diversificación (Años 10+)	147
8.2	Estrategias para Escalabilidad y Expansión	147
8.2.1	Expansión Geográfica	148
8.2.2	Ampliación de la Red de Rutas y Vertipuertos	148
8.2.3	Incorporación de Nuevas Tecnologías.....	149
8.2.4	Diversificación de Servicios	149
8.2.5	Estrategias Financieras	150
8.3	Indicadores de Éxito y Medición de Resultados	150

8.3.1	Indicadores Operativos.....	150
8.3.2	Indicadores Financieros.....	151
8.3.3	Indicadores Sociales y Ambientales	151
8.3.4	Sistema de Seguimiento y Evaluación	151
9	Conclusiones y Recomendaciones	152
9.1	Resumen de Hallazgos Clave	152
9.2	Viabilidad y Potencial del Modelo de Negocio	152
9.3	Recomendaciones para Futuras Investigaciones o Proyectos Piloto	154
9.3.1	Actualización Constante del Estado del Arte.....	154
9.3.2	Análisis de Ingresos Derivados.....	154
9.3.3	Expansión de la Red de Vertipuertos y Rutas.....	154
9.3.4	Análisis Socioeconómico y Ambiental	155
9.3.5	Innovación en Rutas Emergentes.....	155
9.3.6	Financiamiento y Colaboraciones	155
9.3.7	Rutas de carga con drones especializados	155
9.3.8	Desarrollo técnico de “vertipacks”	155
9.4	Limitaciones del Estudio.....	156
9.4.1	Limitaciones Tecnológicas.....	156
9.4.2	Limitaciones Económicas	156
9.4.3	Limitaciones Operativas.....	156
9.4.4	Limitaciones Sociales y Ambientales	157
9.4.5	Limitaciones de Datos.....	157
10	Referencias y Bibliografía	158
11	Abreviaturas y Términos	164
12	Anexos.....	166
12.1	Detalle Financiero y Proyecciones.....	166

Imágenes

Imagen 1. Recreación del vertipuerto de Manhattan adaptado a las operaciones de aerotaxis eléctricos.....	25
Imagen 2. Helipuerto de la Torre Picasso, en el distrito financiero de Madrid.....	25
Imagen 3. Previsión de tamaño de mercado de las aeronaves eVTOLs. Fuente: grandviewresearch.com.....	34
Imagen 4. EH216-S de EHang.....	38
Imagen 5. VoloCity de Volocopter.	39
Imagen 6. Lilium Jet de Lilium (Lilium se ha declarado insolvente recientemente).	40
Imagen 7. Joby S4 de Joby Aviation.....	41
Imagen 8. Maker de Archer Aviation.....	42
Imagen 9. VX4 de Vertical Aerospace.....	43
Imagen 10. ALIA-250 de Beta Technologies.	44
Imagen 11. Cora de Wisk Aero.....	45
Imagen 12. Pipistrel 801 de Pipistrel.	46
Imagen 13. Recreación de un posible Vertipuerto o "Aeropuerto Urbano".....	50
Imagen 14. Concepto de Vertipuerto en forma de árbol. EHang Baobab.	51
Imagen 15. Mapa de Madrid con las potenciales ubicaciones de los distintos vertipuertos de la red propuesta.	56
Imagen 16. Mapa aéreo del Aeropuerto Madrid-Barajas, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (I).....	57
Imagen 17. Mapa aéreo del Aeropuerto Madrid-Barajas, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (II)	57
Imagen 18. Mapa aéreo del Aeropuerto Madrid-Barajas, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III)	58
Imagen 19. Mapa aéreo del Distrito Financiero de Madrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (I).....	58
Imagen 20. Mapa aéreo del Distrito Financiero de Madrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (II)	59
Imagen 21. Mapa aéreo del Distrito Financiero de Madrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III)	59
Imagen 22. Mapa aéreo de la estación de tren de Atocha, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (I).....	60
Imagen 23. Mapa aéreo de la estación de tren de Atocha, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (II)	60
Imagen 24. Mapa aéreo de la estación de tren de Atocha, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III)	61
Imagen 25. Mapa aéreo de Mercamadrid, con las ubicaciones propuestas aproximadas para el vertipuerto. (I).....	61
Imagen 26. Mapa aéreo de Mercamadrid, con las ubicaciones propuestas aproximadas para el vertipuerto. (II).....	62

Imagen 27. Mapa aéreo de Mercamadrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (Ubicación I)	62
Imagen 28. Mapa aéreo de Mercamadrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (Ubicación II)	63
Imagen 29. Mapa aéreo de Madrid Río, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (I).....	63
Imagen 30. Mapa aéreo de Madrid Río, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (II).....	64
Imagen 31. Mapa aéreo de Madrid Río, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III).....	64
Imagen 32. Mapa aéreo del Hospital La Paz, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto y la actual helisuperficie utilizada en caso de emergencia.	65
Imagen 33. Mapa aéreo del Hospital La Paz, con la actual helisuperficie utilizada en caso de emergencia.	65
Imagen 34. Mapa aéreo del Hospital La Paz, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto.	66
Imagen 35. Mapa aéreo de la ruta RP01 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.	67
Imagen 36. Mapa aéreo de la ruta RP02 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.	68
Imagen 37. Mapa aéreo de la ruta RT01 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.	69
Imagen 38. Mapa aéreo de la ruta RC01 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.	70
Imagen 39. Mapa aéreo de la ruta RC02 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.	71
Imagen 40. Mapa aéreo del Hospital 12 de Octubre y su helisuperficie utilizada en caso de emergencia. (I).....	72
Imagen 41. Mapa aéreo del Hospital 12 de Octubre y su helisuperficie utilizada en caso de emergencia. (II).....	72
Imagen 42. Mapa aéreo de la ruta RM01 propuesta aproximada con los Vertipuertos / Helisuperficies involucrados.....	73
Imagen 43. Costes Iniciales Totales de cada Vertipuerto en €.	92
Imagen 44. Distribución de cada concepto a los Costes Iniciales Totales.	93
Imagen 45. Costes Operativos Anuales de cada Vertipuerto en €.	94
Imagen 46. Distribución de cada concepto a los Costes Operativos Anuales de los Vertipuertos.	95
Imagen 47. Costes Operativos Anuales de cada Ruta en €.	96
Imagen 48. Distribución de cada concepto a los Costes Operativos Anuales de las Rutas.	96
Imagen 49. Ingresos Anuales por Rutas en Millones de €.	115
Imagen 50. Ingresos Anuales por Rutas en Millones de €.	116
Imagen 51. Porcentaje de Utilización de cada Ruta en el Vertipuerto de Barajas.	118
Imagen 52. Porcentaje de Utilización de cada Ruta en el Vertipuerto de la Torre Picasso.....	118
Imagen 53. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline con pilotos.....	122



Imagen 54. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista con pilotos. ...	123
Imagen 55. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista con pilotos....	124
Imagen 56. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline sin pilotos.....	127
Imagen 57. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista sin pilotos.	128
Imagen 58. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista sin pilotos.	129
Imagen 59. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, con pilotos.	132
Imagen 60. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, sin pilotos.	133

Tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de las características de distintos eVTOLs y sus fabricantes.....	46
Tabla 2. Resumen de la red de vertipuertos propuesta y las rutas involucradas.....	66
Tabla 3. Resumen de las rutas propuestas para la red.....	74
Tabla 4. Costes Iniciales de Diseño y Planificación en euros por Vertipuerto.....	78
Tabla 5. Costes Iniciales de Construcción de Infraestructura en euros por Vertipuerto.....	79
Tabla 6. Costes Iniciales de Sistemas Tecnológicos en euros por Vertipuerto.....	81
Tabla 7. Costes Iniciales de Equipos y Señalización en euros por Vertipuerto.....	81
Tabla 8. Costes Iniciales de Contingencias en euros por Vertipuerto.....	82
Tabla 9. Costes Iniciales de los eVTOLs en euros por Ruta.....	83
Tabla 10. Costes Operativos Anuales de Mantenimiento en euros por Vertipuerto.....	84
Tabla 11. Costes Operativos Anuales de Mantenimiento en euros por Ruta.....	85
Tabla 12. Costes Operativos Anuales de Energía y Servicios en euros por Vertipuerto.....	85
Tabla 13. Costes Operativos Anuales de Energía en euros por Ruta.....	87
Tabla 14. Costes Operativos Anuales de Personal en euros por Vertipuerto.....	88
Tabla 15. Costes Operativos Anuales de Personal en euros por Ruta.....	89
Tabla 16. Costes Operativos Anuales de Seguridad y Seguros en euros por Vertipuerto.....	90
Tabla 17. Costes Iniciales Totales de cada Vertipuerto en k€.	91
Tabla 18. Distribución de cada concepto a los Costes Iniciales Totales.....	92
Tabla 19. Costes Operativos Anuales de cada Vertipuerto en €.	94
Tabla 20. Distribución de cada concepto a los Costes Operativos Anuales de los Vertipuertos.....	95
Tabla 21. Ingresos proyectados de la ruta RP01 por años.....	106
Tabla 22. Ingresos proyectados de la ruta RP02 por años.....	108
Tabla 23. Ingresos proyectados de la ruta RT01 por años.....	110
Tabla 24. Ingresos proyectados de la ruta RC01 por años.....	111
Tabla 25. Ingresos proyectados de la ruta RC02 por años.....	113
Tabla 26. Ingresos proyectados de la ruta RM01 por años.....	115
Tabla 27. Contribución de cada ruta al total de vuelos realizados en cada Vertipuerto.....	117
Tabla 28. Resumen de Costes Iniciales Totales de cada Ruta.....	119
Tabla 29. Resumen de Costes Operativos Anuales Totales de cada Ruta, con y sin Pilotos.....	119
Tabla 30. Costes Totales de cada Ruta por años en €, con y sin pilotos.....	119
Tabla 31. Ingresos Totales de cada Ruta por años en millones de €.	120
Tabla 32. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline con pilotos.....	122
Tabla 33. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista con pilotos.....	123
Tabla 34. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista con pilotos.....	124
Tabla 35. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario baseline con pilotos.....	125
Tabla 36. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario optimista con pilotos.....	126
Tabla 37. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario pesimista con pilotos.....	126
Tabla 38. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline sin pilotos.....	127



Tabla 39. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista sin pilotos.	128
Tabla 40. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista sin pilotos.	129
Tabla 41. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario baseline sin pilotos.	130
Tabla 42. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario optimista sin pilotos.	130
Tabla 43. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario pesimista sin pilotos.	131
Tabla 44. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, con pilotos.	132
Tabla 45. Métricas financieras la red completa a 10 años y un 10% de tasa de descuento, con pilotos.	132
Tabla 46. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, sin pilotos.	133
Tabla 47. Métricas financieras la red completa a 10 años y un 10% de tasa de descuento, sin pilotos.	134
Tabla 48. Tabla Resumen de Riesgos, Impactos y Mitigaciones.	137
Tabla 49. Referencias.	163
Tabla 50. Fuentes.	163
Tabla 51. Abreviaturas y Términos.	165

1 Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

El crecimiento acelerado de la población urbana y la continua expansión de las ciudades han intensificado los desafíos en la movilidad. La congestión de tráfico ha alcanzado niveles críticos en muchas áreas metropolitanas, lo que incrementa los tiempos de viaje, afecta la calidad de vida y genera importantes costes económicos y medioambientales. Además, el transporte terrestre convencional sigue siendo una de las principales fuentes de contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero, lo que agrava la crisis climática global.

Frente a este panorama, las infraestructuras de transporte existentes presentan limitaciones significativas para dar respuesta a las crecientes demandas de movilidad eficiente y sostenible. La construcción de nuevas vías o la ampliación de las actuales resulta en soluciones costosas, lentas de implementar y con un impacto negativo sobre el entorno urbano. Al mismo tiempo, las opciones de transporte público y privado luchan por adaptarse a la evolución de las necesidades de los ciudadanos, ya que la saturación de los sistemas de movilidad afecta tanto a los usuarios como a las operaciones logísticas.

Es en este contexto que la Movilidad Aérea Urbana (UAM) surge como una alternativa innovadora con el potencial de descongestionar las ciudades, reduciendo la presión sobre las infraestructuras terrestres al aprovechar el espacio aéreo urbano. La UAM propone el uso de vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) para el transporte de personas y mercancías en entornos urbanos y suburbanos. Sin embargo, la implementación de este nuevo paradigma enfrenta importantes barreras, tales como la falta de infraestructuras especializadas (vertipuertos), la ausencia de un marco normativo adaptado y la incertidumbre sobre la aceptación pública.

Para materializar el potencial de la UAM, es imprescindible desarrollar una red de vertipuertos que permita a los eVTOL operar de manera segura y eficiente dentro del entorno urbano. Además, se requiere una regulación clara que contemple los requisitos técnicos, operacionales y de seguridad específicos de estos nuevos modos de transporte. Ante estos desafíos, surge la necesidad de explorar modelos de negocio que faciliten la financiación, planificación e implementación de vertipuertos, con el fin de analizar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es evaluar la viabilidad y el potencial de un modelo de negocio basado en la Movilidad Aérea Urbana (UAM), con un enfoque específico en la implementación de una red de vertipuertos y rutas en la ciudad de Madrid. Para alcanzar este objetivo general, se han definido una serie de objetivos específicos que abordan los diferentes aspectos necesarios para el desarrollo e integración de la UAM.

- **Objetivo general:**
 - **Proponer y analizar un modelo de negocio para la implementación de la UAM,** centrado en la creación de una red de vertipuertos en Madrid y su integración

en el ecosistema de transporte urbano a través de esquemas de colaboración público-privada.

- **Objetivos específicos:**
 - **Evaluar la viabilidad económica del proyecto:**
 - Realizar un análisis financiero detallado que contemple los costes de diseño, construcción y operación de los vertipuertos, los costes de adquisición y mantenimiento de aeronaves eVTOL, y los gastos operativos anuales.
 - Estimar los ingresos proyectados a partir de rutas de pasajeros, servicios de carga urgente, transporte médico y rutas turísticas.
 - Incluir un análisis de modelos de ingresos alternativos, como concesiones comerciales y servicios de recarga eléctrica.
 - **Definir los requisitos técnicos y operacionales:**
 - Identificar los aspectos clave en el diseño de los vertipuertos: capacidad de operaciones simultáneas, tiempos de recarga y despegue, y sistemas de seguridad.
 - Definir las especificaciones para una operación segura y eficiente de aeronaves eVTOL, cumpliendo con la normativa de navegación aérea y los estándares de aviación urbana.
 - **Analizar el marco regulatorio actual y proponer mejoras:**
 - Examinar la normativa internacional y local aplicable a los servicios UAM y los vertipuertos.
 - Identificar barreras regulatorias, lagunas legales y posibles puntos de conflicto.
 - Proponer recomendaciones para la adaptación del marco regulatorio y facilitar la implementación segura y escalable de la UAM.
 - **Proponer estrategias de colaboración público-privada (PPP):**
 - Evaluar opciones de financiación como concesiones operativas, joint ventures, co-inversión público-privada, bonos verdes...etc.
 - **Evaluar el impacto social y medioambiental del proyecto:**
 - Analizar el impacto del proyecto en la comunidad, considerando la aceptación pública y la integración con el entorno urbano.

- Evaluar los beneficios medioambientales en términos de reducción de emisiones de CO₂ y ruido, en comparación con el transporte convencional.
- **Desarrollar un plan de implementación escalable:**
 - Proponer fases de desarrollo para la puesta en marcha de la red de vertipuertos y los servicios.
 - Hacer los análisis modularmente para identificar rutas estratégicas y nodos clave.

Estos objetivos buscan proporcionar una base sólida y multidimensional para la implementación de la UAM, abordando no solo la viabilidad técnica y económica, sino también los aspectos sociales y medioambientales que son fundamentales para garantizar el éxito de la iniciativa.

1.3 Justificación y Relevancia

La creciente urbanización y el aumento de la densidad poblacional en las ciudades han generado una demanda sin precedentes de soluciones de movilidad más eficientes y sostenibles. La congestión del tráfico y la saturación de las infraestructuras de transporte tradicionales no solo impactan negativamente en la calidad de vida de los ciudadanos, sino que también representan una amenaza para el medio ambiente, debido al alto nivel de emisiones contaminantes asociado con el transporte terrestre. En este contexto, la Movilidad Aérea Urbana (UAM) se presenta como una alternativa innovadora que podría transformar el futuro del transporte en las ciudades.

La UAM, impulsada por el desarrollo de aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL), principalmente autónomas, promete ofrecer un medio de transporte rápido, eficiente y menos contaminante, que aprovecha el espacio aéreo urbano para descongestionar las vías terrestres. Además, puede complementar los sistemas de transporte público existentes, ofreciendo soluciones para desplazamientos de última milla, conexión entre aeropuertos y centros urbanos, y transporte de mercancías en entornos donde la logística terrestre enfrenta limitaciones.

La implementación de una red de vertipuertos es clave para el desarrollo del modelo de negocio. Estos vertipuertos, diseñados específicamente para la operación de aeronaves eVTOL, no solo deben cumplir con estrictos requisitos de seguridad y eficiencia, sino también integrarse adecuadamente en el tejido urbano para minimizar el impacto en la comunidad. Sin embargo, existen desafíos significativos en cuanto a la regulación, la inversión necesaria y la aceptación social de estas nuevas infraestructuras. Asimismo, existen también dudas sobre la potencial rentabilidad económica de las mismas. Por ello, es fundamental explorar modelos de participación público-privada (PPP) que permitan compartir los riesgos y beneficios, y garantizar una implementación exitosa.

Este proyecto es relevante no solo por su potencial para revolucionar la movilidad urbana, sino también porque responde a las crecientes preocupaciones por la sostenibilidad y el cambio climático. La transición hacia modos de transporte eléctricos y la reducción de la huella de

carbono en las ciudades son prioridades globales, y la UAM puede desempeñar un papel clave en este esfuerzo. Además, el proyecto aborda la necesidad de preparar el marco regulatorio y la infraestructura para una tecnología emergente, posicionando a las ciudades en la vanguardia de la innovación en movilidad.

En resumen, la justificación de este trabajo radica en su contribución a solucionar problemas clave de movilidad, en su alineación con los objetivos de sostenibilidad globales y en su potencial para generar beneficios económicos y sociales a largo plazo. La UAM y los vertipuertos no solo representan una nueva forma de transporte, sino una oportunidad para redefinir el concepto de conectividad urbana y avanzar hacia un futuro más inteligente y sostenible.

1.4 Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster se basa en un enfoque multidisciplinario que combina la investigación cualitativa y cuantitativa, el análisis normativo y el estudio de casos prácticos. El objetivo es proporcionar una evaluación exhaustiva y fundamentada de un modelo de negocio de Movilidad Aérea Urbana (UAM) ubicado en Madrid, con énfasis en el diseño, construcción y operación de una red de vertipuertos y rutas. La metodología se estructurará en varias fases:

- **Fase 1: Revisión de la literatura y marco teórico**

Esta fase inicial consistirá en la recopilación y análisis de bibliografía relevante sobre la UAM, vertipuertos y modelos de participación público-privada. Se definirán los conceptos clave, como la UAM, los eVTOL, los vertipuertos y las PPP, así como los fundamentos de los modelos de negocio en el sector aeronáutico. Esta revisión servirá de base para el [capítulo 2](#), donde se establecerá el marco teórico y conceptual del trabajo.

- **Fase 2: Análisis del estado del arte y contexto actual**

Se realizará un análisis exhaustivo de las tendencias globales en UAM, así como de casos de estudio en ciudades que han implementado o están en proceso de implementar vertipuertos ([capítulo 3](#)). También se examinarán las normativas vigentes, tanto internacionales (EASA, FAA) como locales, para identificar barreras y oportunidades / estado regulatorio. Esta fase incluirá entrevistas con expertos y la recopilación de información de proyectos existentes para obtener una visión práctica de la situación actual.

- **Fase 3: Diseño y planificación de vertipuertos**

Se abordará la identificación de ubicaciones potenciales para los vertipuertos, considerando criterios como la accesibilidad, la demanda y la conectividad con otros modos de transporte ([capítulo 4](#)). Asimismo, se analizarán los requisitos técnicos y operacionales necesarios para el diseño de los vertipuertos, siguiendo las normativas de referencia, y se propondrán estrategias de planificación flexible y adaptativa. Se evaluará también el impacto social y medioambiental de la infraestructura.

- **Fase 4: Desarrollo del modelo de negocio de la UAM**

Esta fase se centrará en la elaboración del modelo de negocio detallado para la UAM, con un enfoque específico en la propuesta de valor, la red de vertipuertos propuesta, descripción de rutas y servicios ofrecidos, segmentación de clientes, análisis de mercado y estrategias de participación público-privada ([capítulo 5](#)). Se llevará a cabo un análisis de costes e ingresos, considerando fuentes de ingresos potenciales.

- **Fase 5: Análisis de viabilidad económica y financiera**

Se realizarán proyecciones financieras detalladas, incluyendo el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), así como una evaluación del impacto de diferentes escenarios en la viabilidad del proyecto ([capítulo 6](#)). También se identificarán los principales riesgos financieros, operativos y regulatorios, y se propondrán estrategias de mitigación.

- **Fase 6: Consideraciones tecnológicas y de innovación**

Se examinarán las últimas innovaciones en tecnologías de eVTOL y sistemas de propulsión, la gestión del tráfico aéreo urbano (U-Space) y la integración de los vertipuertos con infraestructuras tecnológicas y energéticas existentes ([capítulo 7](#)).

- **Fase 7: Plan de implementación y escalabilidad**

Finalmente, se desarrollará un plan de implementación en fases, llegando hasta el despliegue comercial y la expansión a otras ciudades ([capítulo 8](#)). Se establecerán indicadores de éxito para medir el progreso y ajustar la estrategia según sea necesario.

Este enfoque permitirá proporcionar un estudio integral y exhaustivo que sirva como referencia para futuros proyectos en el ámbito de la UAM y la implementación de vertipuertos.

2 Marco Teórico y Conceptual

2.1 Concepto de Movilidad Aérea Urbana (UAM)

2.1.1 Definición y Principios Clave de la Movilidad Aérea Urbana

La Movilidad Aérea Urbana (UAM) es un concepto emergente dentro del ecosistema de transporte urbano que se basa en la utilización de vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL, por sus siglas en inglés) para proporcionar servicios de transporte aéreo en entornos urbanos y suburbanos. Estos vehículos, impulsados por tecnologías eléctricas y sistemas de propulsión avanzados, ofrecen una alternativa más rápida y eficiente en términos energéticos frente a los modos de transporte tradicionales, al aprovechar el espacio aéreo urbano para descongestionar las vías terrestres.

El principal objetivo de la UAM es facilitar desplazamientos de corta y media distancia dentro de ciudades congestionadas, mejorando la accesibilidad y reduciendo los tiempos de viaje. Este nuevo paradigma de movilidad está diseñado para complementar los sistemas de transporte público existentes y proporcionar soluciones a diversos retos; el trayecto final entre el usuario y su destino, el acceso rápido a hubs estratégicos como aeropuertos, distritos financieros o áreas de servicios críticos como hospitales, y en general toda la demanda de servicios de transporte rápidos en el escenario de grandes ciudades con graves problemas de congestión como podría ser Madrid.

Los principios clave de la UAM se basan en tres pilares fundamentales:

- **Sostenibilidad:** El uso de eVTOL, alimentados por energía eléctrica, reduce las emisiones de CO₂ en comparación con el transporte terrestre tradicional y minimiza la contaminación acústica, lo que lo convierte en una opción más ecológica.
- **Eficiencia:** Al operar en el espacio aéreo y evitar la congestión terrestre, la UAM permite tiempos de viaje significativamente más cortos, optimizando el transporte de personas y mercancías en áreas metropolitanas densamente pobladas.
- **Seguridad:** El desarrollo de tecnologías avanzadas de navegación, sistemas de gestión del tráfico aéreo urbano (U-Space) y regulaciones estrictas garantizan la seguridad tanto de los pasajeros como de los habitantes de las ciudades.

No se entienden estos tres principios sin el uso de eVTOLs totalmente autónomos, permitiendo desplazamientos mucho más sostenibles, eficientes y seguros, en un escenario todavía poco maduro y con posibilidades ilimitadas de establecimiento de convenciones como lo es el espacio aéreo urbano.

2.1.2 Vehículos eVTOL y su Rol en la UAM

Uno de los elementos más distintivos de la UAM es el uso de aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL). Estos vehículos, diseñados específicamente para el transporte urbano aéreo, están equipados con tecnologías que permiten maniobras precisas en espacios reducidos, lo cual es esencial en entornos urbanos. A diferencia de los helicópteros tradicionales,

los eVTOL están concebidos para ser más ligeros, silenciosos y energéticamente eficientes, lo que los convierte en una opción viable para operaciones en ciudades densamente pobladas.

Existen diferentes tipos de eVTOL en desarrollo, cada uno con características específicas según su capacidad de carga, autonomía y propósitos operacionales. Mientras que algunos modelos se orientan exclusivamente al transporte de pasajeros, otros priorizan la logística urbana o servicios de emergencia, como evacuación médica. No obstante, el panorama actual revela una gran disparidad en la estabilidad de los fabricantes. Volocopter, tras su fallo en los Juegos Olímpicos de París, enfrenta una situación financiera delicada. Lillium, con serios problemas financieros, podría declararse en quiebra tras la negativa del gobierno alemán a otorgar un préstamo clave. Por otro lado, Joby Aviation y Archer lideran en Estados Unidos, acercándose a la certificación FAA. EHang progresa en China, aunque enfrenta desafíos regulatorios en Europa. Airbus, gigante del sector, avanza lentamente, posiblemente buscando adquirir al actor más rápido en certificarse. Este ecosistema cambiante subraya la importancia de la adaptación estratégica para asegurar el éxito en este sector emergente.

Los avances en la propulsión eléctrica y las baterías han permitido que los eVTOL alcancen niveles de autonomía y rendimiento adecuados para operaciones urbanas. Además, los desarrollos en autonomía y sistemas de vuelo remoto plantean la posibilidad real de que los eVTOL puedan operar sin pilotos humanos, reduciendo los costes operativos y mejorando la eficiencia.

2.1.3 U-Space y Gestión del Tráfico Aéreo

El U-Space es un marco regulatorio y operativo desarrollado por la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) para gestionar de manera eficiente y segura las operaciones de aeronaves no tripuladas, como drones y eVTOLs, en el espacio aéreo europeo. Este concepto está diseñado para afrontar la complejidad de integrar múltiples aeronaves en entornos urbanos y densamente poblados, asegurando su coexistencia con aeronaves tripuladas de forma segura y eficiente. El U-Space no es un sistema operativo tangible ni un software único, sino un conjunto de directrices y estándares destinados a orientar el desarrollo de Sistemas de Gestión del Tráfico Aéreo No Tripulado (UTM). Su objetivo principal es digitalizar y automatizar el espacio aéreo, permitiendo operaciones de alta densidad de forma segura, eficiente y sostenible.

Componentes Clave:

1. Servicios Digitales Automatizados:

- Planificación y gestión de vuelos.
- Supervisión en tiempo real de aeronaves.
- Detección y evitación de conflictos aéreos.
- Gestión de autorizaciones para misiones específicas.

2. Áreas Designadas U-Space:

- Zonas específicas del espacio aéreo donde se aplican los servicios de U-Space, facilitando la coexistencia segura de aeronaves tripuladas y no tripuladas.

3. Proveedores de Servicios U-Space (USSP):

- Entidades responsables de ofrecer los servicios digitales necesarios para gestionar las operaciones, como la planificación de vuelos y el intercambio de datos.

4. Mitigación de Riesgos:

- Aunque no siempre es imprescindible, el U-Space se utilizará como herramienta para reducir riesgos en terreno regulado por EASA, permitiendo a las autoridades otorgar autorizaciones a ciertas operaciones complejas.

El U-Space cobra sentido en un espacio aéreo con una densidad significativa de drones y eVTOLs. Sin embargo, en escenarios con baja densidad, como un bajo número de rutas y eVTOL, no sería necesario implementar este marco ni sus proveedores (CISP/USSP). Aun así, EASA contempla el U-Space como una solución estratégica para mitigar riesgos y habilitar operaciones en entornos regulados.

El desarrollo del U-Space sigue un enfoque progresivo:

- **Fase U1:** Registro de operadores y geocercas.
- **Fase U2:** Planificación avanzada y seguimiento en tiempo real.
- **Fase U3:** Gestión de operaciones complejas con detección y evitación automatizada.
- **Fase U4:** Digitalización y automatización total.

En la Movilidad Aérea Urbana (UAM), el U-Space desempeñará un papel clave al gestionar el tráfico aéreo en entornos urbanos. Permitirá, además, la integración con plataformas digitales para servicios de compra y venta de billetes, optimizando la experiencia del usuario y garantizando operaciones seguras. En terrenos donde EASA regula, el U-Space actuará como un mitigador de riesgos clave, dando a las autoridades herramientas para autorizar operaciones específicas.

A pesar de que el U-Space no es imprescindible en todos los escenarios, sí que es un marco esencial para habilitar operaciones seguras y eficientes en entornos de alta densidad aérea, marcando el camino hacia una integración completa de eVTOLs y drones en el espacio urbano.

2.1.4 Relevancia de la UAM para el Futuro del Transporte Urbano

La Movilidad Aérea Urbana (UAM) se posiciona como una solución clave para enfrentar los desafíos derivados del crecimiento urbano acelerado, la congestión vial y el impacto medioambiental asociado al transporte terrestre. Según estimaciones de la ONU [\[R1\]](#), para 2050 más del 68% de la población mundial residirá en áreas urbanas, lo que aumentará significativamente la presión sobre las infraestructuras de transporte existentes. Sin embargo, su potencial no se limita únicamente al entorno urbano: la UAM también puede revolucionar la movilidad en zonas rurales y conexiones interurbanas, donde las distancias y la falta de infraestructura eficiente presentan retos significativos.

En áreas urbanas, la UAM ofrece una alternativa viable para descongestionar las redes de transporte al aprovechar el espacio aéreo, reduciendo la necesidad de ampliar las infraestructuras terrestres. Estudios del McKinsey Global Institute [\[R2\]](#) destacan la importancia de la UAM como parte de las soluciones emergentes para mitigar la saturación de las ciudades, mejorando tanto el transporte de personas como de mercancías a través de rutas aéreas

dedicadas. Asimismo, este sistema puede conectar de manera eficiente áreas estratégicas como aeropuertos, distritos financieros, zonas de servicios críticos y hospitales. Por ejemplo, en regiones con hospitales dispersos, los eVTOL podrían facilitar el traslado rápido de pacientes o suministros médicos entre instalaciones en un tiempo significativamente menor al de los métodos convencionales.

En el contexto interurbano o rural, la UAM tiene aplicaciones igualmente prometedoras. En países como Costa Rica, se están explorando rutas que conecten el aeropuerto con zonas de hoteles de lujo, donde los trayectos por carretera resultan largos y engorrosos. De manera similar, en España, la conexión entre islas como Formentera e Ibiza a través de eVTOLs podría reducir drásticamente los tiempos de viaje y mejorar la accesibilidad en rutas donde el transporte marítimo o terrestre es menos eficiente. Estas aplicaciones interurbanas e intermodales abren nuevas posibilidades para la movilidad regional, mejorando la conectividad y dinamizando el desarrollo económico en áreas menos urbanizadas.

Además de su impacto en la movilidad, la UAM también tiene implicaciones medioambientales favorables. Los eVTOL, impulsados por energía eléctrica, generan menos emisiones de carbono y contaminantes atmosféricos en comparación con los vehículos de transporte terrestre tradicionales. Según el Foro Económico Mundial [\[R3\]](#), la adopción masiva de la UAM podría desempeñar un papel importante en la reducción de emisiones de CO₂, tanto en las ciudades como en áreas rurales y regionales. Además, la reducción de ruido en comparación con helicópteros hace que estos vehículos sean más viables para operar en entornos mixtos donde conviven zonas urbanas, suburbanas y rurales.

El impacto económico de la UAM también es significativo. La implementación de sistemas de UAM no solo optimizaría la movilidad, sino que también generaría nuevas oportunidades económicas mediante la creación de empleos en la construcción y operación de infraestructuras como los vertipuertos. Esto incluye aplicaciones estratégicas en entornos rurales o interurbanos, donde la logística eficiente puede dinamizar economías locales. En zonas como Nueva York, el transporte aéreo de lujo ya es rentable con helicópteros, y los eVTOL tienen el potencial de reducir costos operativos y expandir este modelo hacia nuevos segmentos, incluyendo la logística y el transporte de personas en zonas menos densas.

En definitiva, la UAM no solo representa una innovación en el transporte urbano, sino que también se proyecta como una solución esencial para la conectividad rural e interurbana. Con el respaldo de un marco normativo adecuado y el desarrollo de infraestructuras adaptadas, la UAM tiene el potencial de integrarse plenamente en redes de transporte urbano y regional, transformando la manera en que las personas y los bienes se desplazan dentro y fuera de las ciudades. Este enfoque ampliado no solo aumenta la sostenibilidad y eficiencia, sino que también abre la puerta a nuevos modelos de negocio y oportunidades de desarrollo económico en un espectro más amplio de contextos geográficos.

2.2 Vertipuertos: Definición y Funcionalidad

Los vertipuertos son infraestructuras diseñadas específicamente para permitir el despegue y aterrizaje de aeronaves de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), ya sean tripuladas o no. Estos vehículos, que utilizan sistemas de propulsión eléctricos distribuidos, como los eVTOL, requieren

instalaciones adaptadas a sus características operacionales, lo que convierte a los vertipuertos en un componente esencial del ecosistema de Movilidad Aérea Urbana (UAM).



Imagen 1. Recreación del vertiporto de Manhattan adaptado a las operaciones de aerotaxis eléctricos.

2.2.1 Ubicación y Tipologías de Vertipuertos:

Madrid es un buen ejemplo de la evolución en el uso de helipuertos en entornos urbanos. Durante los años 90 y principios de los 2000, muchas torres de nueva construcción incluyeron helipuertos en sus diseños. Sin embargo, con el tiempo, estos espacios dejaron de utilizarse activamente, y actualmente la mayoría de los nuevos edificios ya no incorporan esta infraestructura. En la actualidad, los helipuertos operativos / helisuperficies en Madrid se limitan principalmente a los hospitales, que los emplean para casos de emergencia. En el ámbito privado, el heliporto de la Torre Picasso es una excepción, ya que sigue manteniendo su certificación y opera activamente.



Imagen 2. Heliporto de la Torre Picasso, en el distrito financiero de Madrid.

Con la llegada de los eVTOLs, la reactivación de este tipo de infraestructura debe centrarse en vertipuertos específicamente diseñados para su operación. En este contexto, el diseño modular se presenta como una solución clave. Este enfoque, inspirado en los "helipacks" para helicópteros, permite la instalación ágil y adaptable de plataformas de aterrizaje flexibles en techos o estructuras preexistentes. La modularidad facilita la integración con la infraestructura urbana existente y permite ajustar el diseño según la demanda y las necesidades específicas del entorno. De esta manera, los vertipuertos no solo contribuirán a crear una red eficiente de movilidad aérea urbana, sino que también mejorarán la accesibilidad en ubicaciones donde anteriormente los helipuertos no habían prosperado.

El abanico de posibilidades para la ubicación de vertipuertos en Madrid es amplio, reflejando su potencial intermodal y estratégico. Algunas propuestas señalan que los primeros vertipuertos podrían ubicarse en aeropuertos, donde su integración con el transporte aéreo convencional resulta natural y eficiente. Otros sugieren que hoteles y hospitales, especialmente aquellos con acceso restringido o difícil, serían lugares ideales para albergar esta infraestructura. Los puertos, debido a su componente logístico y multimodal, también ofrecen una oportunidad interesante para los vertipuertos, mejorando la conexión entre el transporte marítimo y aéreo. Además, los centros logísticos, zonas empresariales y residenciales podrían beneficiarse enormemente de la incorporación de estas plataformas, proporcionando soluciones rápidas y sostenibles para el transporte de mercancías y pasajeros.

En el caso concreto de Madrid, un planteamiento estratégico para la ubicación de vertipuertos podría incluir puntos clave como el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, los principales hospitales de la ciudad, áreas empresariales como la zona de la Torre Picasso, o zonas logísticas como Mercamadrid. Este enfoque permite aprovechar la infraestructura ya existente, al tiempo que se adapta a las necesidades específicas de la movilidad aérea urbana, posicionando a Madrid como un referente en la integración de los vertipuertos en el tejido urbano.

2.2.2 Requisitos de Diseño y Operación:

El diseño de un vertipuerto debe abordar una serie de factores críticos para garantizar la seguridad y eficiencia operativa de los eVTOL. A diferencia de los helipuertos, los vertipuertos exigen un enfoque algo más sofisticado debido a las características específicas de estas aeronaves y a los desafíos adicionales que presentan los entornos urbanos densos.

Entre los requisitos más destacados se incluyen:

- **Volúmenes de espacio libre de obstáculos:** Los vertipuertos deben incluir un área de protección vertical que permita maniobras seguras durante las fases de despegue y aterrizaje. Este espacio, generalmente en forma de embudo tridimensional, asegura que las aeronaves puedan operar sin riesgo de colisión con estructuras cercanas, incluso en entornos urbanos densamente construidos.
- **Traectorias de aproximación omnidireccionales:** A diferencia de los helicópteros, los eVTOL están diseñados para operar con trayectorias de despegue y aterrizaje multidireccionales. Esto mejora la flexibilidad operativa y permite adaptar las

- operaciones a las restricciones del espacio urbano y a las condiciones meteorológicas cambiantes, maximizando la eficiencia en ubicaciones complejas.
- **Mitigación de impactos ambientales:** Los vertipuertos deben integrar estrategias de diseño para reducir su impacto sobre el entorno urbano. Esto incluye:
 - **Reducción del ruido:** Implementación de tecnologías para minimizar el ruido generado por los eVTOL durante las operaciones.
 - **Gestión del flujo de aire descendente:** El "downwash" generado por las aeronaves puede afectar a peatones, vehículos e infraestructuras cercanas, por lo que debe controlarse adecuadamente.
 - **Iluminación y señalización sostenible:** Uso de tecnologías que eviten interferencias con la fauna local y minimicen molestias a los residentes.
 - **Condiciones meteorológicas locales:** Es crucial considerar el efecto de ráfagas de viento y turbulencias generadas por la forma de los edificios y la disposición del entorno urbano. Estas perturbaciones pueden comprometer la estabilidad de los eVTOL, especialmente durante maniobras críticas como el despegue y aterrizaje. Por tanto, el diseño del vertipuerto debe incluir análisis detallados de los patrones de viento locales y sus interacciones con la infraestructura circundante.

El diseño de un vertipuerto eficiente no solo debe cumplir con estos requisitos operativos y ambientales, sino que también debe adaptarse a las particularidades del espacio urbano en el que se encuentre, asegurando operaciones seguras, sostenibles y funcionales para el futuro de la movilidad aérea.

2.2.3 Integración con el Entorno Urbano:

Uno de los mayores desafíos de los vertipuertos es su integración en entornos urbanos altamente congestionados, donde el espacio es limitado y la convivencia con otros modos de transporte es esencial. Para ello, los vertipuertos no solo deben cumplir con requisitos técnicos y de seguridad, sino que también deben estar diseñados para facilitar una intermodalidad eficiente con sistemas de transporte terrestre, como trenes, autobuses o vehículos autónomos. Esto incluye la planificación de accesos adecuados para el flujo de pasajeros y la implementación de servicios auxiliares como estaciones de carga eléctrica para las aeronaves.

2.2.4 Eficiencia y Escalabilidad:

Los vertipuertos deben estar diseñados para ser modulares y escalables, permitiendo la adaptación a la evolución tecnológica de los eVTOL y al crecimiento de la demanda. Los diseños modulares permiten agregar o ajustar áreas operativas según sea necesario, mientras que la escalabilidad asegura que las infraestructuras puedan expandirse de manera eficiente sin necesidad de una reconstrucción significativa. Esta capacidad de adaptación es clave para asegurar que los vertipuertos puedan evolucionar con las necesidades cambiantes de la UAM.

2.2.5 Estándares Internacionales y Normativas de Certificación y Operación:

El proceso de certificación de un vertipuerto, aunque inspirado en la certificación de helipuertos, está evolucionando para abordar los requisitos específicos de los eVTOL. Actualmente, los estándares completos para vertipuertos no están definidos en muchos países, por lo que se

emplean marcos provisionales basados en regulaciones existentes de helipuertos, con orientación inicial proporcionada por la EASA y la FAA.

El proceso actual es el siguiente, teniendo en cuenta la última información y documentos regulatorios disponibles:

- **Diseño y Preparación de la Infraestructura:**
 - La infraestructura debe cumplir con requisitos básicos para operaciones seguras de eVTOL, incluyendo dimensiones específicas para las áreas de aterrizaje y despegue.
 - Carga eléctrica y estacionamiento: Además de integrar sistemas de carga eléctrica para eVTOL, se podrían incluso aprovechar las instalaciones de carga eléctrica para vehículos terrestres, fusionando el concepto de vertipuerto con el de "electrolinera". Esto optimiza los costes de instalación y facilita la legalización de estas infraestructuras.
 - Sistemas de gestión de tráfico que integren el concepto de U-Space cuando haya un número suficiente de eVTOLs como para ser necesario.
- **Aplicación de Normativas Existentes:** Dado que aún no existen regulaciones definitivas en varios países para vertipuertos, muchos están adaptando las normativas de helipuertos, como el Reglamento (UE) 2019/947, utilizándolas como base en Europa para asegurar que cumplan con los estándares de seguridad aérea. Por otra parte, la FAA, a través de su Engineering Brief 105A [\[R4\]](#) publicado en septiembre del año 2024, ha actualizado sus guías incorporando dimensiones para áreas críticas como FATO y TLOF, así como nuevos lineamientos para mitigar el impacto del flujo descendente (downwash/outwash) y mejorar la seguridad de operaciones en entornos urbanos. Estas normas incluyen criterios técnicos como:
 - Alturas mínimas de vuelo en zonas urbanas, delimitación de espacio aéreo y procedimientos de emergencia.
 - Requisitos de certificación en sistemas de iluminación, señalización y planificación de rutas.
- **Solicitud de Certificación:** La empresa o entidad que desee certificar un vertipuerto presenta la solicitud a la autoridad nacional de aviación (por ejemplo, AESA en España), incluyendo un plan detallado del diseño y operaciones del vertipuerto. En el caso de startups como Vertiports Network, han adaptado un enfoque modular en este proceso para facilitar la adaptación de la infraestructura según la demanda.
- **Pruebas y Validación de la Infraestructura:**
 - Validación de la integración con sistemas de tráfico aéreo urbano (U-Space).
 - Pruebas de seguridad para operaciones autónomas o semiautónomas de eVTOL.
 - Infraestructura de carga y acceso seguro para pasajeros y personal.
- **Inspección Final y Emisión del Certificado:** Tras validar el cumplimiento de los estándares de seguridad y funcionalidad, la autoridad emite un certificado. En Europa, se espera que en un futuro cercano, EASA establezca normas completas y adaptadas exclusivamente para vertipuertos. En el caso de la FAA, ya se han dado pasos con guías específicas, pero se espera una normativa más avanzada.

La EASA y la FAA están desarrollando normas más específicas, con la FAA avanzando hacia un enfoque basado en el rendimiento en sus futuras normativas.

2.3 Modelos de Participación Público-Privada (PPP)

La colaboración entre el sector público y el privado es fundamental para la implementación exitosa de la movilidad aérea urbana. Los modelos de PPP ofrecen un marco eficaz para abordar los desafíos financieros y operativos que plantea el desarrollo de infraestructuras complejas como los vertipuertos. Este tipo de cooperación permite aprovechar las fortalezas de ambas partes: el sector público aporta regulación, planificación urbana y financiamiento parcial, mientras que el sector privado contribuye con la innovación, la eficiencia operativa y la inversión tecnológica. Debido a la fase tan temprana de implementación de estas tecnologías en el mundo, no es posible entender una parte sin la otra.

Estos modelos son ampliamente utilizados en el desarrollo de infraestructura de transporte tradicional y ahora se adaptan al emergente sector de UAM.

2.3.1 Tipos de Modelos de PPP Adaptables a Vertipuertos

2.3.1.1 Concesión Operativa de Infraestructuras:

En este modelo, la entidad pública otorga a una empresa privada la concesión para diseñar, construir y operar el vertipuerto durante un período específico, permitiéndole recuperar su inversión a través de tarifas por el uso de la infraestructura. Este tipo de colaboración es adecuado para ciudades con gran demanda potencial de UAM, ya que permite una financiación inicial privada y el retorno gradual mediante ingresos operativos.

2.3.1.2 Contratos de Colaboración y Desarrollo (Joint Ventures)

A través de joint ventures, el gobierno y entidades privadas como fabricantes de eVTOL, operadores de infraestructuras o empresas tecnológicas pueden establecer una entidad conjunta para compartir los costos de desarrollo de los vertipuertos y la tecnología relacionada (gestión de tráfico U-Space, recarga de eVTOL, etc.). Esto facilita una mayor integración entre la infraestructura y los avances en tecnología y logística, garantizando que las necesidades del mercado y la seguridad operativa estén cubiertas.

2.3.1.3 Modelos de Co-Inversión Público-Privada

En este esquema, tanto el sector público como el privado aportan recursos financieros para la construcción y operación de vertipuertos. Las ayudas públicas, como fondos de innovación o subvenciones para infraestructuras sostenibles, se combinan con inversión de capital riesgo o fondos de infraestructuras. En España y Europa, los fondos de cohesión y programas como SESAR y el Horizonte Europa pueden actuar como elementos clave de co-financiación.

2.3.1.4 Iniciativas de Innovación y Pilotaje

Este modelo permite a las entidades públicas y privadas trabajar en conjunto para desarrollar proyectos piloto o demostrativos, de modo que se puedan probar y adaptar las operaciones de UAM y vertipuertos antes de su despliegue completo. Los pilotos ayudan a definir estándares regulatorios y operativos, como los establecidos en proyectos de SESAR y U-Space, permitiendo la colaboración en áreas como el control de tráfico y la aceptación pública.

2.3.2 Beneficios de las asociaciones público-privadas en la UAM:

- **Distribución de riesgos y beneficios:** Uno de los mayores atractivos de los modelos PPP es la capacidad de distribuir de manera equitativa los riesgos financieros y operativos entre las partes involucradas. La inversión inicial en infraestructuras como los vertipuertos puede ser considerable, y la participación del sector privado permite repartir los costos, al tiempo que se asegura que el sector público mantenga cierto control sobre el desarrollo y las normativas. Al mismo tiempo, el sector privado tiene incentivos para maximizar la eficiencia operativa y asegurar un retorno de la inversión en el largo plazo.
- **Optimización de recursos:** En un modelo PPP, las entidades públicas y privadas pueden aprovechar mejor sus recursos disponibles. El sector privado puede asumir el liderazgo en la construcción y operación de vertipuertos, mientras que el sector público facilita el acceso a terrenos estratégicos, asegura el cumplimiento de los requisitos normativos y es forzado a involucrarse activamente en la creación de las legislaciones necesarias. Esta optimización de recursos no solo reduce los tiempos de desarrollo, sino que también permite una implementación más flexible, escalable y alineada con las necesidades reales del negocio.
- **Facilitación de la innovación tecnológica:** Las empresas privadas líderes en la industria UAM, han demostrado su capacidad para desarrollar tecnologías innovadoras y productos disruptivos como los eVTOL. A través de asociaciones con autoridades aeroportuarias y organismos reguladores, estas empresas pueden integrar sus tecnologías en el tejido urbano, asegurando que la infraestructura, como los vertipuertos, esté alineada con los requisitos técnicos de sus aeronaves. Estas colaboraciones también promueven el desarrollo de estándares de seguridad y operación, lo que es esencial para garantizar la confianza del público y de los reguladores en estas nuevas formas de movilidad.
- **Atracción de inversión y generación de empleo:** Los modelos PPP en el contexto de la UAM también ayudan a atraer inversión privada significativa. Empresas como Skyports, Atlantic Aviation (Antigua división de vertipuertos de Ferrovial) y IDOM han mostrado interés en participar en proyectos de vertipuertos, lo que ha generado oportunidades de empleo y crecimiento económico a nivel local y regional. Además, la creación de infraestructuras como los vertipuertos puede convertirse en un motor para el desarrollo de nuevas áreas urbanas o la revitalización de zonas ya existentes, lo que contribuiría al crecimiento económico y a la modernización de las ciudades.

2.3.3 Modelos y casos de colaboración exitosos:

Los modelos de participación público-privada (PPP) han demostrado ser esenciales para facilitar la financiación, desarrollo y operación de estas infraestructuras innovadoras. A continuación, se presentan algunos casos representativos de colaboración y proyectos inspiradores:

2.3.3.1 Vertiports Network y su Enfoque Innovador en la Certificación, Operación e Infraestructura Modular

Vertiports Network es un referente en el desarrollo y operación de vertipuertos mediante modelos colaborativos. Durante una entrevista realizada para este TFM, el CEO explicó cómo la empresa trabaja con soluciones modulares de infraestructura, diseñadas para ser instaladas en techos de edificios, terrenos infrautilizados y áreas urbanas estratégicas, optimizando así el uso del suelo. Este enfoque facilita una rápida adaptación y escalabilidad, respondiendo a la demanda cambiante. La empresa colabora con ayuntamientos y propietarios de espacios estratégicos para implementar una red eficiente, reforzando la importancia de establecer una base normativa sólida mediante su contribución al desarrollo de estándares de operación y certificación. Esta estrategia busca mitigar los riesgos financieros para las ciudades al compartir la inversión y los costes operativos con socios privados.

2.3.3.2 Uber Air: Pionero en Movilidad Aérea On-Demand

Uber Air, una iniciativa de Uber Elevate, ha trabajado en colaboración con gobiernos locales y entidades de transporte para desarrollar un modelo de movilidad aérea bajo demanda. En ciudades como Los Ángeles y Dallas, Uber ha explorado la integración de sus eVTOL con helipuertos existentes y espacios públicos adaptados, creando un sistema que promete ser accesible y complementario al transporte terrestre. Aunque no es un PPP en sentido estricto, Uber Air ha impulsado la participación pública a través de consultas y acuerdos de infraestructura. Este modelo, que se basa en tecnologías de reparto de vuelos y precios competitivos similares a los de un UberX, se centra en maximizar la eficiencia y reducir la congestión urbana.

2.3.3.3 EHang y la Colaboración Gubernamental en China

EHang es un ejemplo clave de cómo los fabricantes de eVTOL pueden colaborar con el sector público para avanzar en la UAM. La empresa ha conseguido certificaciones para sus aeronaves autónomas, como el EH216, trabajando estrechamente con el gobierno chino para establecer operaciones piloto en ciudades como Guangzhou. Este enfoque público-privado ha sido fundamental para probar y validar el uso de eVTOLs en transporte de pasajeros y logística, sentando un precedente para futuras iniciativas en otros países.

2.3.3.4 Volocopter y la Integración Multimodal en Europa

Volocopter ha sido un actor destacado en la integración de eVTOL en sistemas de transporte europeos. La empresa ha colaborado con el aeropuerto de Frankfurt y otras entidades para desarrollar vertipuertos ubicados estratégicamente, permitiendo transbordos eficientes entre vuelos comerciales y servicios de eVTOL. Además, ha trabajado en conjunto con reguladores como EASA para validar operaciones seguras y fomentar un marco normativo adaptado. Este modelo busca demostrar cómo los vertipuertos pueden complementar los grandes hubs de transporte, ofreciendo rutas cortas para viajes intermodales y reduciendo la congestión en tierra.

2.4 Fundamentos de Modelos de Negocio en el Sector Aeronáutico

El sector aeronáutico ha sido históricamente dominado por grandes fabricantes, como Airbus y Boeing, cuyos modelos de negocio tradicionales han girado en torno a la venta de aeronaves a

aerolíneas comerciales y operadores privados. Sin embargo, la aparición de la Movilidad Aérea Urbana (UAM) está impulsando un cambio en el sector, abriendo la puerta a nuevos modelos de negocio y atrayendo tanto a estos actores establecidos como a empresas emergentes, como Volocopter y EHang. Estos nuevos actores buscan capitalizar la tecnología eVTOL y adaptar sus enfoques comerciales para responder a las necesidades específicas de este ecosistema urbano en desarrollo.

2.4.1 Modelos de negocio tradicionales en la aviación:

En la aviación comercial tradicional, los modelos de negocio se sustentan en pilares como:

- **Fabricación y Venta de Aeronaves:** Los fabricantes generan ingresos principalmente a partir de la venta de aeronaves a aerolíneas y operadores, complementado por contratos de mantenimiento y soporte técnico a largo plazo.
- **Servicios Comerciales de Transporte:** Las aerolíneas y operadores de vuelos chárter ofrecen servicios de transporte a través de la venta de billetes y servicios asociados de carga, creando un flujo continuo de ingresos basado en la demanda de pasajeros y mercancías.
- **Mantenimiento y Soporte:** El mantenimiento de las aeronaves se gestiona mediante contratos que aseguran el cumplimiento de los requisitos de seguridad, generando ingresos recurrentes.

No obstante, estos modelos de negocio no son directamente aplicables a la UAM, ya que el desarrollo de vertipuertos y eVTOL requiere adaptarse a una infraestructura urbana y a un público objetivo diferente. Los costes iniciales de inversión, la demanda de flexibilidad operativa y el enfoque en la intermodalidad son factores clave que transforman el enfoque comercial en este sector.

2.4.2 Nuevos modelos de negocio en la UAM:

A medida que la UAM se desarrolla, las empresas exploran modelos de negocio innovadores que maximicen el valor de la infraestructura de vertipuertos y aprovechen las características únicas de los eVTOL. Algunos de los enfoques emergentes incluyen:

- **Servicios de Transporte Bajo Demanda (Aero-Taxi):** Inspirado en el modelo de “transporte bajo demanda” de las plataformas de movilidad terrestre, el sector de UAM adopta soluciones similares, permitiendo a los usuarios solicitar vuelos mediante aplicaciones móviles. En estos servicios, los usuarios pueden pagar por cada trayecto, generando un flujo de ingresos constante. Este modelo permite a las empresas diversificar su oferta, atendiendo tanto a pasajeros como a servicios de logística.
- **Alquiler de Aeronaves y Operación Directa por Fabricantes (Movilidad como Servicio - MaaS):** En lugar de vender los eVTOL a operadores externos, según entrevistas con algunos de los integrantes de las mesas técnicas de implementación de la UAM en Madrid, muchos fabricantes están adoptando un modelo en el que mantienen la propiedad de las aeronaves y ofrecen contratos de alquiler o leasing a operadores locales o incluso gestionan directamente las operaciones de vuelo. Este enfoque no solo reduce los costos iniciales de inversión para los operadores locales, sino que también

permite a los fabricantes mantener el control sobre la calidad, el mantenimiento y la experiencia del usuario, creando un modelo de ingresos recurrentes. Este modelo está alineado con el concepto de Movilidad como Servicio (MaaS), en el que se permite una integración intermodal, combinando rutas aéreas y terrestres en un solo servicio accesible para los usuarios.

- **Gestión de Infraestructura de Vertipuertos:** Los vertipuertos, más que simples puntos de aterrizaje y despegue, se conciben como centros de ingresos diversificados. En este modelo, empresas privadas en colaboración con el sector público desarrollan y gestionan la infraestructura, generando ingresos a través de tarifas de uso, servicios de carga eléctrica y concesiones comerciales en áreas estratégicas, como techos de edificios o zonas aledañas a aeropuertos. Esto permite un modelo de negocio en el que la modularidad y flexibilidad de los vertipuertos facilitan la adaptación a distintas ubicaciones y niveles de demanda, maximizando la eficiencia operativa y el acceso urbano.
- **Modelo de Suscripción y Vuelos Compartidos:** Empresas como Blade y Joby Aviation exploran modelos de suscripción en los que los usuarios pagan una tarifa fija mensual o anual por acceso ilimitado a vuelos dentro de una red de vertipuertos. Este enfoque permite a los operadores optimizar la ocupación de los eVTOL mediante vuelos compartidos, reduciendo así el costo por pasajero y haciéndolo accesible a un público más amplio.
- **Colaboraciones Estratégicas y Diversificación de Servicios:** La UAM demanda una colaboración estratégica entre diversos actores, como fabricantes de aeronaves, proveedores de infraestructura y tecnología, y autoridades locales. Estas alianzas facilitan el desarrollo conjunto de soluciones innovadoras, como redes de vertipuertos y servicios complementarios que aumenten la rentabilidad. La diversificación incluye servicios adicionales en los vertipuertos, tales como estaciones de carga, áreas comerciales y publicidad, lo que permite a las empresas aprovechar múltiples fuentes de ingresos dentro del mismo ecosistema.

3 Estado del Arte y Contexto Actual

3.1 Tendencias Globales en Movilidad Aérea Urbana

3.1.1 Tendencias en desarrollo de eVTOLs por países e inversión

La inversión global en eVTOLs ha crecido significativamente:

- **Estados Unidos:** Lidera el desarrollo de eVTOLs con un mercado estimado en crecimiento anual del 53% desde 2024 hasta 2030. En 2023, el mercado estadounidense contribuyó con una parte importante del valor total global de 1.2 mil millones de USD, y se espera que esta cifra alcance los 23.4 mil millones de USD para 2030. El país ha invertido miles de millones en investigación y desarrollo, con grandes empresas y startups colaborando para avanzar en la tecnología de movilidad aérea.
- **Asia-Pacífico:** El crecimiento proyectado en esta región es del 60% anual, impulsado por la rápida urbanización y la congestión en ciudades como Tokio y Beijing. China ha mostrado un compromiso particular, apoyando proyectos de ciudades inteligentes y soluciones sostenibles de transporte con fuertes incentivos gubernamentales.
- **Europa:** Con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) esperada de 56.8% hasta 2035, la región está enfocada en mantener un desarrollo sostenible en línea con las regulaciones de la EASA. Países como Alemania y el Reino Unido están destinando millones en infraestructura y desarrollo tecnológico.

Globalmente, se observa una tendencia creciente en cuanto a CAGR para el mercado de los eVTOLs y en general la UAM:

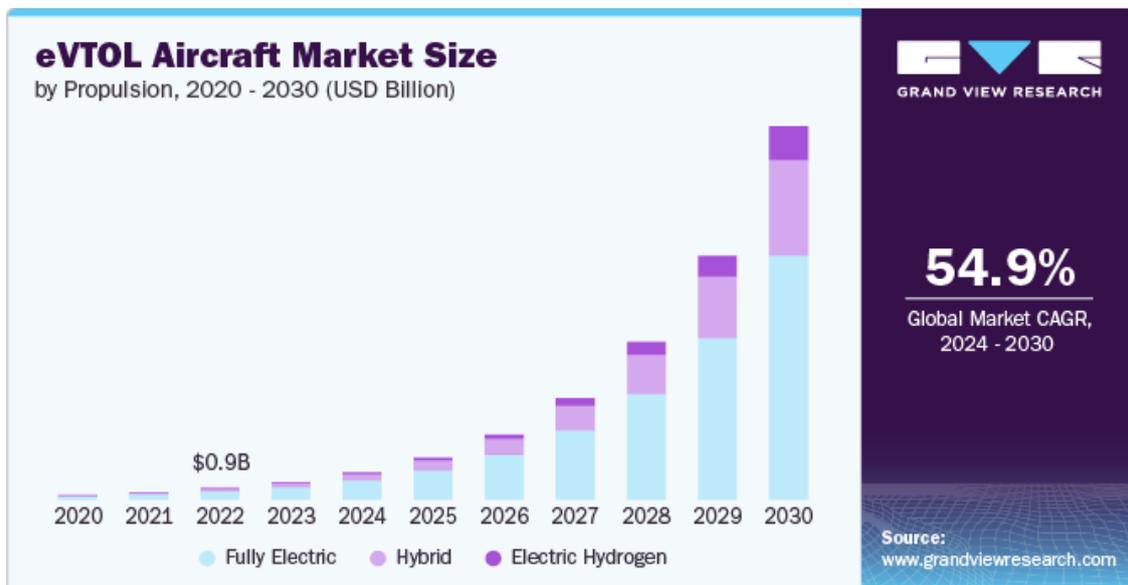


Imagen 3. Previsión de tamaño de mercado de las aeronaves eVTOLs. Fuente: grandviewresearch.com.

3.1.2 Tendencias en inversión de infraestructura de vertipuertos

La infraestructura de vertipuertos es clave para la viabilidad de la UAM, y se proyecta una expansión significativa:

- **Global:** Se esperan 1,044 vertipuertos en desarrollo para 2028, con una inversión estimada de al menos 1.09 mil millones de USD solo en construcción y equipamiento con tecnología de movilidad aérea urbana, incluyendo cargadores eléctricos. Sin embargo, debido a desafíos regulatorios, el número podría ajustarse a alrededor de 623 vertipuertos operativos.
- **Regiones líderes:** Los Emiratos Árabes Unidos, Corea del Sur, China y Estados Unidos han mostrado un compromiso sólido con el desarrollo de la infraestructura necesaria para apoyar operaciones de eVTOL, incluyendo la construcción de estaciones de carga y plataformas de despegue y aterrizaje.

3.1.3 Países en adopción de eVTOLs y ejemplos reales

- **Estados Unidos:** Ciudades como Los Ángeles y Miami han avanzado en la integración de eVTOLs, previendo redes de taxis aéreos activas para 2028, apoyadas por grandes inversiones y colaboraciones público-privadas. En otras ciudades como Los Ángeles, Archer Aviation planea lanzar una red de taxis aéreos eVTOL en 2026, con vertipuertos estratégicamente ubicados para reducir tiempos de viaje en áreas congestionadas.
- **Emiratos Árabes Unidos (Dubái):** Un líder pionero en la adopción de taxis aéreos, con infraestructura y proyectos para facilitar el despliegue de servicios comerciales de eVTOL. Dubái ha firmado acuerdos con empresas como Joby Aviation y Skyports Infrastructure para desarrollar una red de taxis aéreos eVTOL, con servicios comerciales previstos para 2026. La ciudad está construyendo vertipuertos en ubicaciones clave, como el Aeropuerto Internacional de Dubái y Palm Jumeirah, para facilitar la operación de estos taxis aéreos.
- **China:** Ha realizado importantes inversiones en iniciativas de movilidad aérea y políticas de apoyo, posicionándose como uno de los principales países en adoptar y desarrollar eVTOLs. EHang, una empresa china, ha desarrollado el eVTOL EHang 216, que ha realizado vuelos de prueba en varias ciudades chinas y en otros países. El gobierno chino apoya activamente el desarrollo de la movilidad aérea urbana, facilitando pruebas y certificaciones para estos vehículos. China está invirtiendo en infraestructura y políticas para integrar los eVTOL en su sistema de transporte, posicionándose como líder en la adopción de esta tecnología.

Estas cifras y ejemplos demuestran el rápido avance y las inversiones sustanciales dirigidas a la UAM y su infraestructura de soporte, destacando un enfoque global hacia el transporte aéreo urbano más eficiente y sostenible.

3.2 Regulaciones y Normativas en la UAM

El desarrollo de la regulación para la Movilidad Aérea Urbana (UAM) y, específicamente, la infraestructura de vertipuertos, está avanzando en distintas regiones con enfoques complementarios. A continuación, se resumen algunos de los puntos más importantes:

3.2.1 EASA y la normativa U-Space en Europa:

La Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) ha implementado el paquete regulatorio de U-Space, diseñado para la integración segura de las operaciones de UAS y eVTOL en entornos urbanos. Este marco regula la gestión de tráfico aéreo no tripulado y la interacción con

aeronaves tripuladas, priorizando la seguridad y eficiencia en áreas urbanas densas. Los Reglamentos (UE) 2021/664, 2021/665 y 2021/666 establecen un esquema para coordinar estas operaciones y garantizar la seguridad operacional mediante mecanismos de separación y gestión de flujos aéreos.

3.2.1.1 U-Space

El U-Space es un marco regulatorio y operativo desarrollado por la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) para integrar de manera segura y eficiente las operaciones de aeronaves no tripuladas (UAS) en el espacio aéreo europeo. Este concepto busca facilitar un alto volumen de operaciones de drones, especialmente en entornos urbanos, garantizando la seguridad y eficiencia del tráfico aéreo.

Componentes clave del U-Space:

- **Servicios Digitales y Automatizados:** Implementación de servicios que permiten la gestión automatizada de las operaciones de UAS, incluyendo planificación de vuelos, gestión de autorizaciones y seguimiento en tiempo real.
- **Designación de Volúmenes de Espacio Aéreo:** Definición de zonas específicas donde se aplican los servicios de U-Space, facilitando la coexistencia segura de aeronaves tripuladas y no tripuladas.
- **Interoperabilidad y Conectividad:** Establecimiento de estándares para asegurar la comunicación efectiva entre diferentes sistemas y actores involucrados en las operaciones de UAS.

Objetivos principales del U-Space:

- **Seguridad:** Garantizar que las operaciones de UAS no comprometan la seguridad del espacio aéreo ni de las personas en tierra.
- **Eficiencia:** Optimizar el uso del espacio aéreo y los recursos disponibles para facilitar un alto volumen de operaciones de drones.
- **Sostenibilidad:** Promover prácticas que minimicen el impacto ambiental de las operaciones de UAS.

Implementación del U-Space:

La implementación del U-Space se estructura en fases progresivas, cada una introduciendo servicios y capacidades adicionales:

- **Fase U1:** Servicios iniciales como registro de operadores y aeronaves, identificación electrónica y geocercas.
- **Fase U2:** Servicios avanzados de gestión de vuelos, incluyendo planificación, aprobación y seguimiento en tiempo real.
- **Fase U3:** Servicios de apoyo para operaciones más complejas, como detección y evitación de obstáculos y otras aeronaves.
- **Fase U4:** Implementación completa de servicios con altos niveles de automatización y digitalización.

Este enfoque escalonado permite una integración gradual y segura de los UAS en el espacio aéreo europeo, adaptándose a los avances tecnológicos y las necesidades operativas.

3.2.2 FAA en Estados Unidos:

La Administración Federal de Aviación (FAA) ha lanzado estándares de diseño para vertipuertos a través del Engineering Brief 105, cubriendo aspectos como el diseño geométrico, áreas de aproximación y despegue (FATO), y requerimientos de carga. Incluye la instalación de estaciones de carga eléctrica y protocolos de seguridad específicos para gestionar riesgos asociados a baterías de litio.

La normativa establece que los vertipuertos deben cumplir con criterios estrictos de separación y control de seguridad, con sistemas de extinción de incendios adecuados y personal capacitado.

3.2.3 Mesas técnicas de trabajo y avances en regulación:

Tanto en Europa como en Estados Unidos, el desarrollo de la normativa de UAM sigue en proceso. Existen mesas técnicas nacionales y locales que reúnen a reguladores, expertos de la industria y operadores para adaptar las regulaciones actuales a las necesidades emergentes de la UAM. Estos espacios de trabajo permiten que las regulaciones evolucionen y se ajusten conforme surgen nuevas tecnologías y modelos operacionales.

3.2.4 Desafíos y enfoque en sostenibilidad:

Las regulaciones deben abordar la seguridad de los sistemas de propulsión eléctrica, como las baterías, que pueden alcanzar temperaturas extremadamente altas en caso de incendio. Esto implica que los vertipuertos deben contar con equipos y protocolos especializados para mitigar riesgos.

El marco de U-Space también se centra en la sostenibilidad, buscando una integración armónica en las ciudades y promoviendo un uso eficiente del espacio y la energía.

3.3 Fabricantes y Actores de UAM en el mercado de los eVTOLs

El mercado de los vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOLs) se ha convertido en un pilar clave en la evolución de la movilidad aérea urbana (UAM). Este sector, impulsado por el crecimiento de la tecnología eléctrica y la necesidad de soluciones de transporte más sostenibles y eficientes, cuenta con la participación de numerosos fabricantes y actores influyentes que han presentado modelos innovadores. A continuación, se detallan los principales desarrolladores de eVTOLs, sus modelos más avanzados y los usos actuales o previstos para estas aeronaves. Muchos de estos modelos no son más que prototipos. Sin embargo, otros como el **EHang 216-S**, uno de los más prometedores, ya ha sido probado y ha realizado vuelos autónomos en ciudades de China, uno de los grandes impulsores de esta tecnología.

3.3.1 EHang

- **Modelo destacado:** EHang 216-S.

El EHang 216-S es un eVTOL totalmente autónomo, diseñado sin piloto a bordo y con una capacidad para transportar a 2 pasajeros. Tiene una autonomía de 35 km y un consumo eléctrico

de 48.6 kWh por cada 100 km recorridos. Con un MTOM de 600 kg, es uno de los modelos más ligeros y está dirigido a trayectos cortos en entornos urbanos. Su diseño autónomo lo hace destacar por su enfoque en la movilidad sin piloto, abriendo las puertas a un futuro de transporte completamente automatizado.

Es un eVTOL que ya ha sido probado en múltiples ciudades de China, demostrando su potencial en transporte de pasajeros y logística.

Fuentes: [\[R26\]](#), [\[R27\]](#), [\[R28\]](#), [\[R29\]](#)



Imagen 4. EH216-S de EHang.

3.3.2 Volocopter

- **Modelo destacado:** VoloCity.

El VoloCity de Volocopter requiere un piloto y tiene capacidad para un pasajero. Con una autonomía también de 35 km y un consumo bastante elevado de 85.7 kWh por cada 100 km, este modelo se enfoca en ofrecer servicios de movilidad urbana y conexiones de corta distancia. Su MTOM de 900 kg y su diseño compacto lo hacen adecuado para operar en entornos congestionados, proporcionando una alternativa eficiente y rápida a los taxis convencionales.

Es un eVTOL diseñado para operar en el corazón de las ciudades, con pruebas exitosas en ciudades como Singapur y Dubái, donde se evalúa su viabilidad como servicio de taxi aéreo.

Fuentes: [\[R29\]](#), [\[R30\]](#)



Imagen 5. VoloCity de Volocopter.

3.3.3 Lilium

- **Modelo destacado:** Lilium Jet.

El Lilium Jet es un eVTOL de mayor capacidad, con capacidad para 6 pasajeros y un piloto. Con una autonomía impresionante de 300 km y un consumo de 83.3 kWh por cada 100 km, se posiciona como un modelo apto para trayectos interurbanos. Su MTOM es de 3,175 kg, lo que lo convierte en uno de los más pesados. Este modelo apunta a revolucionar los viajes regionales, conectando ciudades con una velocidad y eficiencia superiores a los transportes convencionales.

Es un eVTOL planificado para cubrir rutas regionales, conectando ciudades de manera rápida y eficaz.

Fuentes: [\[R31\]](#), [\[R32\]](#)



Imagen 6. Lilium Jet de Lilium (Lilium se ha declarado insolvente recientemente).

3.3.4 Joby Aviation

- **Modelo destacado:** Joby S4.

El Joby S4 es un modelo de 4 plazas para pasajeros, con un piloto adicional. Tiene una autonomía de 240 km y un consumo eléctrico de 41,7 kWh por cada 100 km. Su MTOM es de 2404 kg, lo que lo hace relativamente ligero para su capacidad de pasajeros. Teniendo en cuenta que su OEM es de 1950 kg, le permite tener una carga útil de hasta 454 kg. Este eVTOL está diseñado para ofrecer un balance entre eficiencia y capacidad, orientándose a vuelos comerciales de corta a mediana distancia, buscando minimizar el tiempo de viaje dentro de una ciudad o entre ciudades cercanas.

Es un eVTOL concebido para operar como taxi aéreo en entornos urbanos y suburbanos, ofreciendo un transporte rápido y libre de emisiones.

Fuentes: [\[R32\]](#), [\[R33\]](#), [\[R34\]](#)



Imagen 7. Joby S4 de Joby Aviation.

3.3.5 Archer Aviation

- **Modelo destacado:** Maker

El Archer Maker tiene una configuración similar al Joby S4, con un piloto y capacidad para 4 pasajeros. Tiene una autonomía de 160 km y un consumo eléctrico de 62.5 kWh por cada 100 km, con un MTOM de 1,500 kg. Este eVTOL es ligero y eficiente, y su diseño apunta a ser un taxi aéreo que pueda operar en rutas programadas, ofreciendo soluciones de transporte prácticas en ciudades con alta densidad de tráfico.

Este eVTOL tiene un uso planeado para ofrecer servicios de movilidad aérea en áreas metropolitanas densamente pobladas.

Fuentes: [\[R29\]](#), [\[R35\]](#)



Imagen 8. Maker de Archer Aviation.

3.3.6 Vertical Aerospace

- **Modelo destacado:** VX4.

El VX4 de Vertical Aerospace también cuenta con capacidad para 4 pasajeros y requiere un piloto. Su autonomía es de 160 km y su consumo de 62.5 kWh por cada 100 km, con un MTOM considerablemente mayor de 2,700 kg. La diferencia de peso lo hace más robusto, lo cual podría darle una ventaja en cuanto a seguridad y estabilidad, destacándose como un vehículo de transporte público aéreo para trayectos de mediana distancia.

El uso de este eVTOL se enfoca en cubrir distancias urbanas y regionales, con pedidos de aerolíneas como American Airlines, reflejando un creciente interés comercial.

Fuentes: [\[R36\]](#), [\[R37\]](#)

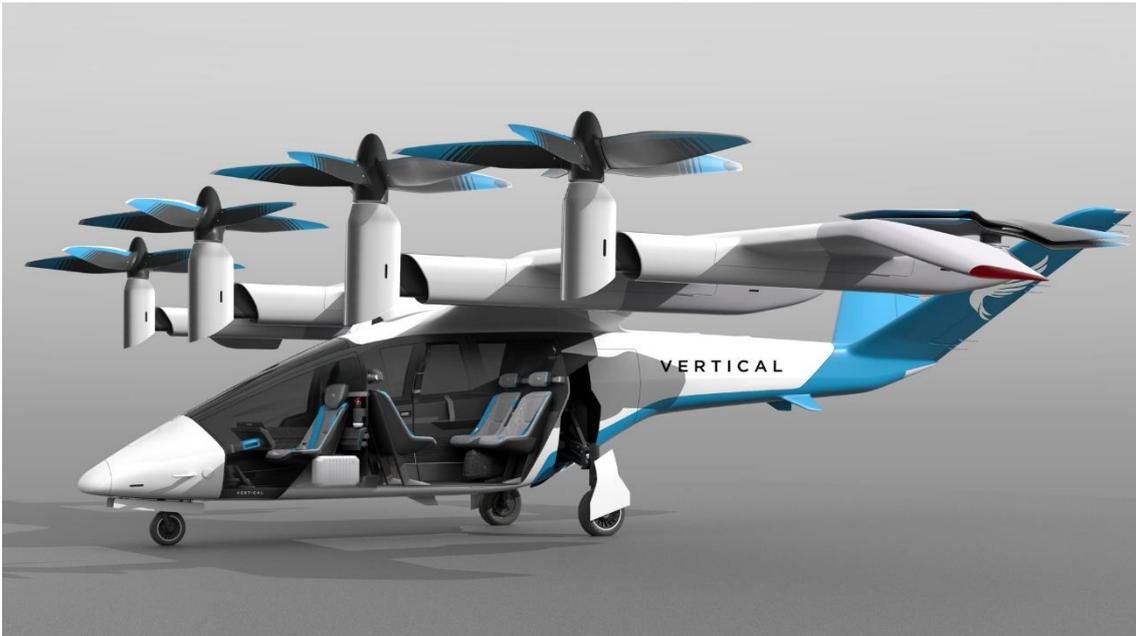


Imagen 9. VX4 de Vertical Aerospace.

3.3.7 Beta Technologies

- **Modelo destacado:** Alia-250.

El Alia-250 de Beta Technologies tiene una autonomía de 460 km, lo que lo convierte en el modelo con mayor capacidad de distancia. Este eVTOL tiene capacidad para 5 pasajeros más el piloto y un consumo de 43.5 kWh por cada 100 km, con un MTOM de 2,721 kg. Este modelo se destaca por su eficiencia energética y su capacidad para vuelos de larga distancia en el contexto de los eVTOLs, siendo adecuado tanto para transporte regional como para aplicaciones logísticas.

Este eVTOL fue desarrollado principalmente para transporte de carga y pasajeros en rutas regionales, con pruebas en Estados Unidos.

Fuentes: [\[R29\]](#), [\[R38\]](#), [\[R39\]](#)



Imagen 10. ALIA-250 de Beta Technologies.

3.3.8 WiskAero

- **Modelo destacado:** Cora.

El Cora de Wisk Aero es un eVTOL completamente autónomo, con capacidad para 2 pasajeros y sin piloto. Tiene una autonomía de 100 km y un consumo de 100 kWh por cada 100 km. Su MTOM es de 1,100 kg, lo que lo hace adecuado para trayectos interurbanos de corta distancia, siendo uno de los pocos modelos que apunta al transporte aéreo autónomo sin asistencia humana.

Este eVTOL está enfocado en servicios de transporte aéreo autónomo, ha realizado pruebas en Nueva Zelanda y es pionero en vuelos no tripulados.

Fuentes: [\[R40\]](#), [\[R41\]](#), [\[R42\]](#)



Imagen 11. Cora de Wisk Aero.

3.3.9 Pipistrel

- **Modelo destacado:** Pipistrel 801.

El Pipistrel 801 es un eVTOL que requiere un piloto y puede transportar a 4 pasajeros. Con una autonomía de 96 km y un consumo de 62.5 kWh por cada 100 km, su MTOM es de 1,500 kg. Este modelo se orienta a trayectos cortos y busca ofrecer una alternativa eficiente y ecológica en el transporte aéreo, apuntando principalmente a viajes urbanos y suburbanos.

Este eVTOL está pensado para prestar servicios de taxi aéreo y movilidad urbana, con vínculos con proyectos como Uber Elevate.

Fuentes: [\[R29\]](#), [\[R43\]](#)

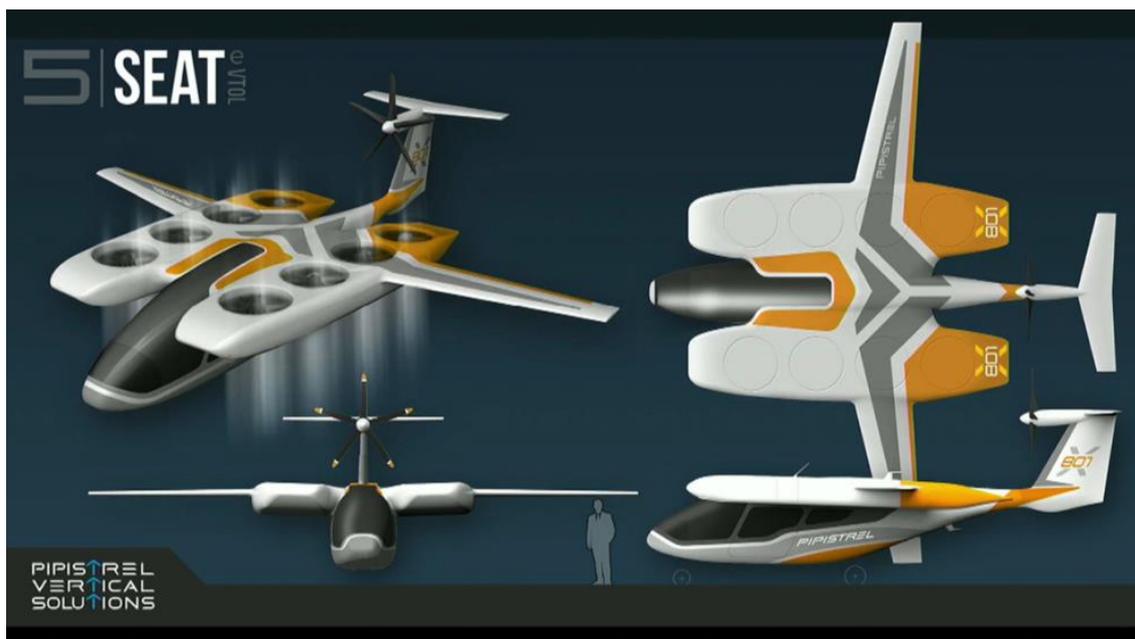


Imagen 12. Pipistrel 801 de Pipistrel.

3.4 Resumen de los principales eVTOLs e hipótesis a utilizar

A continuación, se presenta una tabla a modo de resumen con los principales eVTOLs analizados y sus características y se hace una propuesta sobre los modelos que se utilizarán para el desarrollo del modelo de negocio:

Fabricante	Modelo eVTOL	Rango (km)	Batería (kWh)	Consumo Eléctrico (kWh/100 km)	Autónomo (Sí/No)	Pilotos	Asientos para Pasajeros	MTOM (kg)
EHang	216-S	35	17	48,6	Sí	0	2	600
Volocopter	VoloCit y	35	30	85,7	No	1	1	1000
Lilium	Lilium Jet	300	250	83,3	No	1	6	3175
Joby Aviation	Joby S4	240	100	41,7	No	1	4	2177
Archer Aviation	Maker	160	100	62,5	No	1	4	1500
Vertical Aerospace	VX4	160	100	62,5	No	1	4	2700
Beta Technologies	Alia-250	460	200	43,5	No	1	5	2721
Wisk Aero	Cora	100	100	100,0	Sí	0	2	1100
Pipistrel	Pipistrel 801	96	60	62,5	No	1	4	1500

Tabla 1. Tabla comparativa de las características de distintos eVTOLs y sus fabricantes.

Dado que el mercado de los eVTOLs todavía está en una fase muy temprana de desarrollo y muchos de los modelos aún están en etapas de prueba, se propone utilizar un modelo estándar para el desarrollo del Business Case. El modelo seleccionado es el:

1. **Joby S4:** Este modelo ha sido seleccionado por ser uno de los que tiene más expectativas de salir adelante en el corto plazo. Su capacidad para 4 pasajeros, junto



con su autonomía de 240 km un MTOM de 1814 kg y un consumo de 43,5 kWh por cada 100 km, lo convierten en un candidato ideal para analizar la viabilidad económica del modelo de negocio. Se considerará una velocidad de crucero de unos 300 km/h, inferior a la declarada por el fabricante. Además, también se estudiarán las proyecciones financieras de este mismo modelo como si fuera autónomo. Este enfoque ofrece una perspectiva distinta respecto a los costos operativos y la eficiencia del sistema, lo cual puede ser determinante en escenarios futuros de movilidad urbana aérea.

4 Diseño y Planificación de Vertipuertos

4.1 Identificación de Ubicaciones Potenciales

La selección de ubicaciones para vertipuertos debe basarse en criterios clave que aseguren la viabilidad y eficacia de la operación. Sin embargo, dado que la regulación actual y los estándares técnicos para los vertipuertos aún no están completamente definidos, el modelo de negocio utiliza hipótesis basadas en la normativa vigente y en la casuística de cada nodo potencial, ajustándose a las particularidades de cada entorno urbano. Algunos de los criterios de selección más importantes son:

- **Accesibilidad:** Proximidad a centros urbanos, distritos financieros, estaciones de transporte público y otros puntos estratégicos.
- **Conectividad:** Integración fluida con otros modos de transporte, como estaciones de tren y paradas de autobús.
- **Demanda:** Análisis de las zonas con mayor necesidad de transporte rápido, considerando áreas congestionadas y regiones con alto flujo de tráfico.

4.1.1 Vertipacks: Enfoque modular y escalable

Los vertipacks son plataformas modulares diseñadas para maximizar la flexibilidad y adaptarse al entorno urbano disponible. Estas estructuras permiten configuraciones escalables que pueden expandirse según las necesidades operativas y el crecimiento de la demanda. Sus características principales incluyen:

- **Sistemas de carga rápida de baterías:** Infraestructura preparada para la recarga eficiente de eVTOLs eléctricos.
- **Estaciones de mantenimiento:** Zonas habilitadas para revisiones técnicas y operaciones de mantenimiento ligero.
- **Áreas de espera para pasajeros:** Espacios confortables diseñados para ofrecer una experiencia óptima al usuario.

La modularidad de los vertipacks es comparable al concepto de helipacks utilizados en operaciones de helicópteros, pero con un enfoque optimizado para la movilidad aérea urbana. Esto permite una implementación progresiva y adaptable en función de la evolución de las operaciones y la aceptación social.

En este modelo de negocio, cada vertipuerto se adapta a las especificaciones técnicas y regulatorias actuales, minimizando los riesgos asociados a la falta de estandarización y facilitando la validación de la infraestructura mediante proyectos piloto en entornos controlados. Esto garantiza que las estimaciones económicas sean realistas y sostenibles en un contexto de desarrollo gradual del mercado de UAM.

4.2 Requisitos Técnicos y Operacionales

Para el diseño de vertipuertos, se deben considerar los siguientes aspectos técnicos y operacionales para garantizar la eficiencia y seguridad de las operaciones de eVTOL. Además, se plantea la posibilidad de que estas infraestructuras también gestionen operaciones de drones

más pequeños, dedicados principalmente al transporte de pequeñas cargas, ampliando así su funcionalidad.

Requisitos Generales:

- **Dimensiones mínimas:**
 - Plataformas de al menos 20 m de diámetro para operaciones seguras de eVTOL de tamaño medio.
 - Áreas específicas más pequeñas para drones ligeros, con plataformas de aterrizaje de entre 2 y 5 m de diámetro.
- **Capacidades:**
 - Espacios de estacionamiento con carga rápida para baterías de al menos 1 MW de capacidad por eVTOL.
 - Estaciones de recarga para drones con capacidades de carga más bajas (por ejemplo, entre 10 y 50 kW), distribuidas en zonas optimizadas para múltiples unidades simultáneamente.
- **Infraestructura eléctrica:**
 - Fuente de alimentación de alta capacidad que permita recargas continuas y rápidas para eVTOL, con una conexión de al menos 400 V y una red trifásica.
 - Redes auxiliares de menor capacidad dedicadas a drones, que permitan una carga eficiente sin interferir en las operaciones principales de los eVTOL.
- **Accesibilidad de personas y cargamentos:**
 - Pasillos de mínimo 1.5 m de ancho para el flujo de pasajeros y accesos para cargamentos ligeros.
 - Áreas diferenciadas para la gestión de pequeñas cargas, con acceso automatizado o semi-automatizado para drones logísticos.
- **Seguridad:**
 - Sistemas de extinción de incendios con agua pulverizada o espumas, adecuados para mitigar riesgos de baterías de litio en eVTOL y drones.
 - Separación de zonas de almacenamiento de baterías y puntos de carga para minimizar riesgos en caso de incidente.
- **Espacio para servicios auxiliares:**
 - Al menos el 10% del espacio total debe dedicarse a servicios como oficinas de operación, zonas de carga y almacenamiento.
- Áreas específicas para la supervisión y operación de drones, con capacidad para gestionar simultáneamente múltiples vuelos automatizados.

Requisitos Adicionales para Drones:

Dado que los drones más pequeños tienen características operativas y técnicas diferentes a las de los eVTOL, se deben considerar los siguientes aspectos:

- **Plataformas y áreas de maniobra:**
 - Espacios más compactos que permitan el despegue y aterrizaje simultáneo de múltiples drones.

- Separación física o zonificación clara entre las áreas de operación de drones y eVTOL para evitar interferencias.
- **Carga y logística:**
 - Sistemas de carga rápida y estandarizada para drones, con estaciones distribuidas para optimizar la eficiencia operativa.
 - Áreas específicas para manipulación de pequeños paquetes, integradas con sistemas automatizados de logística para maximizar la productividad.
- **Integración en el tráfico aéreo:**
 - Interconexión con sistemas de gestión de tráfico aéreo (U-Space), que permita coordinar las operaciones de drones y eVTOL en un entorno compartido.

Este enfoque integrado no solo asegura que los vertipuertos estén optimizados para las operaciones de eVTOL, sino que también les prepara para gestionar futuras demandas relacionadas con el creciente uso de drones en la logística urbana y regional. Así, estas infraestructuras pueden maximizar su utilidad, diversificando su alcance y adaptándose a un ecosistema de movilidad aérea más complejo y dinámico.

4.3 Planificación Flexible y Adaptativa para Vertipuertos

La planificación de vertipuertos debe enfocarse en un diseño modular y escalable que responda a la evolución de la demanda y los avances tecnológicos en el ecosistema de Movilidad Aérea Urbana (UAM). Dado el estado actual de la regulación y la variabilidad de los nodos potenciales, se utilizarán hipótesis basadas en normativas existentes y la casuística de cada ubicación para realizar estimaciones económicas realistas.



Imagen 13. Recreación de un posible Vertipuerto o "Aeropuerto Urbano".

4.3.1 Diseño modular y Vertipacks

Los vertipuertos pueden construirse utilizando módulos conocidos como "vertipacks", que configuran de forma adaptable las áreas de aterrizaje, plataformas de carga y zonas de espera

para pasajeros. Estos módulos permiten una expansión sencilla de la capacidad operativa sin necesidad de reconstrucciones importantes. Pueden incluir elementos como:

- **Estaciones de carga rápida y sistemas de Battery Swapping:** Equipadas para recargar múltiples eVTOLs de manera simultánea mediante conexiones de alta potencia. También pueden contar con áreas de almacenamiento de baterías para el reemplazo rápido en operaciones intensivas.
- **Zonas de mantenimiento ligero:** Espacios dedicados a revisiones rápidas y ajustes menores que no requieren instalaciones permanentes, optimizando los tiempos de servicio sin interrumpir las operaciones principales.

4.3.2 Gestión de aeronaves en tiempos de inactividad

Es esencial optimizar el uso del espacio disponible en los vertipuertos para gestionar las aeronaves cuando no están en operación. Las estrategias de estacionamiento deben adaptarse a la ubicación y características de cada nodo:

- **Estacionamientos a cielo abierto:** Áreas rentables con acceso directo a las aeronaves, ideales para climas moderados y condiciones de seguridad controladas. Permiten rotaciones rápidas sin necesidad de infraestructuras adicionales complejas.
- **Zonas de carga y espera:** Espacios donde las aeronaves permanecen conectadas a sistemas de carga mientras esperan su próximo vuelo, asegurando su operatividad constante y minimizando tiempos muertos.
- **Integración con infraestructuras cercanas:** En ubicaciones cercanas a aeropuertos o centros logísticos, es posible aprovechar acuerdos de colaboración para utilizar instalaciones existentes, reduciendo los costes de construcción de áreas adicionales.



Imagen 14. Concepto de Vertipuerto en forma de árbol. EHang Baobab.

4.3.3 Escalabilidad y Gestión de la Congestión

La planificación debe contemplar un crecimiento escalonado de la red de vertipuertos mediante la incorporación de sistemas de gestión de tráfico aéreo avanzados, como *U-Space*, que optimizan las ventanas de despegue y aterrizaje. Estos sistemas permiten:

- Asignación automatizada de rutas y horarios: Evita cuellos de botella mediante ajustes en tiempo real de las operaciones.
- Monitoreo continuo de la capacidad operativa: Permite identificar y resolver congestiones antes de que afecten la eficiencia del servicio.

4.4 Evaluación del Impacto Social y Medioambiental

El desarrollo de vertipuertos y la operación de eVTOLs en entornos urbanos presenta oportunidades significativas para mejorar la calidad de vida y reducir la congestión, pero también desafíos sociales y medioambientales que deben abordarse estratégicamente para garantizar su viabilidad y aceptación.

4.4.1 Impacto Acústico

Aunque los eVTOLs son más silenciosos que los helicópteros convencionales, su operación puede generar ruido, especialmente en despegues, aterrizajes y vuelos a baja altitud sobre zonas densamente pobladas. Para mitigar este impacto, se proponen medidas como:

- **Diseño de rutas optimizadas:** Definición de corredores aéreos que eviten zonas residenciales y utilicen vías urbanas y corredores naturales como referencia.
- **Tecnologías de reducción de ruido:** Implementación de barreras acústicas y materiales absorbentes en los vertipuertos, así como aislamiento en las plataformas de despegue y aterrizaje. Según estudios, la utilización de barreras acústicas y materiales absorbentes en estas plataformas puede reducir el ruido en un 30-40% si se implementan correctamente.
- **Restricción de horarios:** Limitación de vuelos nocturnos y en horarios sensibles para evitar molestias en las comunidades cercanas.

4.4.2 Sostenibilidad y Emisiones

Los eVTOLs eliminan las emisiones directas de carbono al funcionar con energía eléctrica. Sin embargo, para asegurar un modelo de negocio alineado con los principios de sostenibilidad:

- **Fuentes de energía renovable:** Se recomienda que los vertipuertos cuenten con instalaciones de generación propia de energía, como paneles solares y sistemas de almacenamiento, para reducir la dependencia de la red eléctrica convencional. Como se verá más adelante, no resulta del todo eficiente este tipo de tecnologías para alimentar las necesidades de los vertipuertos. Sin embargo, sí que se podrían hacer campos solares específicos alejados dichos vertipuertos, que sirvan para nutrir las necesidades energéticas de la red, favoreciendo la adopción ecológica.
- **Huella de carbono del ciclo de vida:** Evaluación de las emisiones indirectas (fabricación, mantenimiento y reciclaje de baterías) para implementar políticas de economía circular y reutilización de componentes.

- **Bonos verdes y créditos sostenibles:** Utilización de mecanismos de financiación que incentiven la reducción de emisiones y refuercen el compromiso con los objetivos de desarrollo sostenible.

4.4.3 Integración Urbana y Aceptación Social

La integración de vertipuertos en el entorno urbano es clave para fomentar la aceptación pública y generar un impacto positivo:

- **Diseño urbano amigable:** Incorporación de techos verdes, jardines verticales y estructuras arquitectónicas que armonicen con el entorno y minimicen el impacto visual.
- **Accesibilidad:** Ubicación estratégica de los vertipuertos cerca de nodos intermodales de transporte, garantizando accesos peatonales y conexiones rápidas con transporte público.
- **Proyectos piloto participativos:** Implementación de proyectos piloto con participación activa de las comunidades para validar el impacto y generar confianza.

4.4.4 Beneficios Sociales y Estrategias de Mitigación

La UAM aporta beneficios significativos, como la reducción de tiempos de traslado y la mejora de la movilidad en emergencias médicas, pero debe comunicarse de forma efectiva:

- **Campañas de concienciación:** Iniciativas de difusión que destaquen los beneficios tangibles, como menor congestión y mejora de la calidad del aire.
- **Evaluaciones de impacto comunitario:** Realización de estudios periódicos para identificar preocupaciones ciudadanas y aplicar mejoras en función de los resultados.
- **Programas de responsabilidad social:** Colaboraciones con gobiernos locales para invertir en infraestructura y servicios que beneficien a las comunidades cercanas.

4.5 Proceso General para el Alta de un Vertipuerto

Actualmente no existe un proceso general para el alta de un vertipuerto. Sin embargo, para distintos estudios y proyectos piloto se está utilizando preliminarmente el proceso de alta de un helipuerto, ya que ambos tipos de infraestructura comparten una evidente serie de características similares que los hace tendentes a también tener un proceso de alta equivalente. A modo informativo, se proporciona el proceso de alta de un helipuerto:

4.5.1 Estudio de viabilidad inicial y elección de ubicación

- Realizar un estudio de viabilidad para determinar la demanda potencial y las características del sitio donde se desea instalar el vertipuerto. Este estudio debe incluir análisis de tráfico aéreo, integración con otros modos de transporte y consideraciones sobre la infraestructura urbana.
- Elegir una ubicación adecuada que cumpla con los requisitos técnicos y regulatorios, como espacio libre de obstáculos, acceso a infraestructuras urbanas y disponibilidad de espacio aéreo.

4.5.2 Solicitud de permisos y autorizaciones

- Presentar una solicitud formal ante la autoridad aeronáutica competente (AESA en España) para la construcción y operación del vertipuerto. Esta solicitud debe incluir detalles del proyecto, como el diseño técnico, la ubicación exacta y las medidas de seguridad.
- Obtener la aprobación de los organismos locales (ayuntamientos o gobiernos regionales) para cumplir con las normativas de planificación urbana, uso del suelo y medio ambiente.

4.5.3 Evaluación de seguridad y normativas técnicas

- Someter el diseño del vertipuerto a una evaluación de seguridad realizada por la autoridad aeronáutica, asegurándose de que cumpla con las especificaciones técnicas definidas por EASA para vertipuertos.
- Verificar que el diseño del vertipuerto cumpla con las normativas técnicas, como los requisitos de espacio libre de obstáculos, la implementación de ayudas visuales, la iluminación, la gestión del ruido, y los sistemas de seguridad y control de acceso.

4.5.4 Evaluación medioambiental:

- Presentar un informe de impacto ambiental que evalúe cómo la operación del vertipuerto afectará al entorno, tanto en términos de ruido como de emisiones. Este estudio es esencial en áreas urbanas densamente pobladas.
- Incorporar medidas de mitigación del impacto ambiental (uso de energías renovables, sistemas de reducción de ruido, construcción sostenible).

4.5.5 Construcción del vertipuerto

- Una vez obtenidos los permisos y aprobaciones necesarias, se inicia la construcción del vertipuerto, asegurándose de que la infraestructura se adhiera a las normativas aprobadas. El proceso de construcción incluye la instalación de plataformas de aterrizaje, sistemas de recarga eléctrica, sistemas de control de tráfico...etc
- Implementar sistemas de seguridad, señalización y gestión del flujo de aire, así como garantizar que las instalaciones técnicas cumplan con los estándares operacionales requeridos.

4.5.6 Pruebas y certificación

- Realizar pruebas operativas de los sistemas de aterrizaje, recarga y seguridad del vertipuerto bajo la supervisión de la autoridad aeronáutica. Estas pruebas validan que el vertipuerto cumpla con las especificaciones técnicas y operativas necesarias para garantizar un funcionamiento seguro.
- Obtener la certificación final de operación del vertipuerto por parte de la autoridad aeronáutica, que autoriza el uso comercial del mismo para aeronaves VTOL.

4.5.7 Alta oficial y operación

- Una vez certificado, se da de alta el vertipuerto en el registro de infraestructuras aeronáuticas, y se publica su disponibilidad para operar vuelos de UAM.



-
- Iniciar las operaciones del vertipuerto, coordinando con los gestores de tráfico aéreo y servicios logísticos...etc

5 Desarrollo del Modelo de Negocio de Movilidad Aérea Urbana

5.1 Propuesta de Valor y Segmentación de Clientes

La propuesta de valor para la movilidad aérea urbana mediante vertipuertos y aeronaves eVTOL se centra en ofrecer soluciones de transporte rápidas, sostenibles y adaptadas a las necesidades urbanas modernas. Los vertipuertos se conciben como nodos estratégicos que facilitan un acceso eficiente al espacio aéreo urbano, complementando los modos de transporte existentes y mejorando la conectividad en zonas congestionadas.

El enfoque inicial debe centrarse en rutas de alto impacto, con gran demanda potencial y bajo riesgo operativo. Estas rutas maximizarán la rentabilidad mientras minimizan los costos y riesgos regulatorios.

5.1.1 Red de Vertipuertos propuesta

A continuación, se muestra un mapa de Madrid con la red de vertipuertos propuesta:

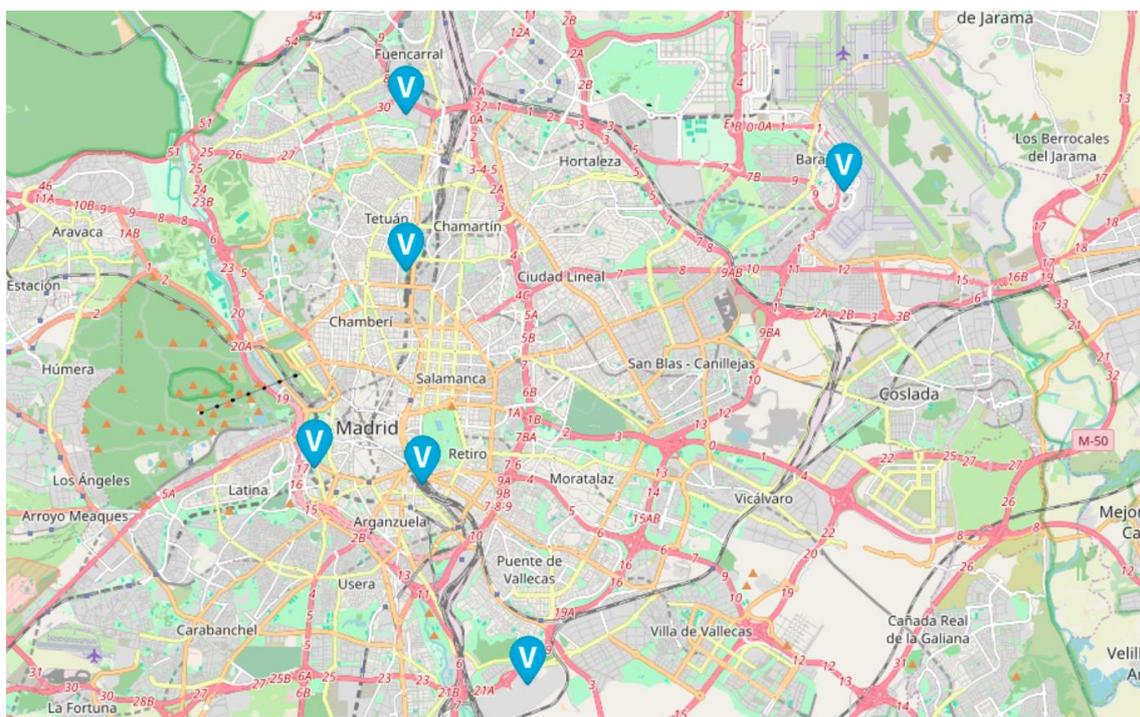


Imagen 15. Mapa de Madrid con las potenciales ubicaciones de los distintos vertipuertos de la red propuesta.

- **Vertipuerto en el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas**
 - **Ubicación Exacta:** Dentro del complejo aeroportuario, cerca de las terminales T1 y T4, para facilitar conexiones rápidas con vuelos nacionales e internacionales. De igual forma el emplazamiento se deberá analizar mediante un estudio de espacio aéreo detallado, analizando las servidumbres aeronáuticas, rutas, obstáculos, etc, del aeropuerto y del vertipuerto para que la interferencia sea la menor posible. Además se podría realizar mediante un

gemelo digital la simulación del comportamiento e interacción operacional entre vertipuerto y aeropuerto.

- **Servicios Cubiertos:**
 - Transporte de pasajeros on-demand y conexiones intermodales.
 - Transporte de carga (paquetería urgente).
 - Servicios médicos (transporte de órganos y medicinas).
- **Justificación:** El aeropuerto es un nodo de transporte clave en Madrid, con alta demanda de intermodalidad y conexiones rápidas.



Imagen 16. Mapa aéreo del Aeropuerto Madrid-Barajas, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto.
(I)

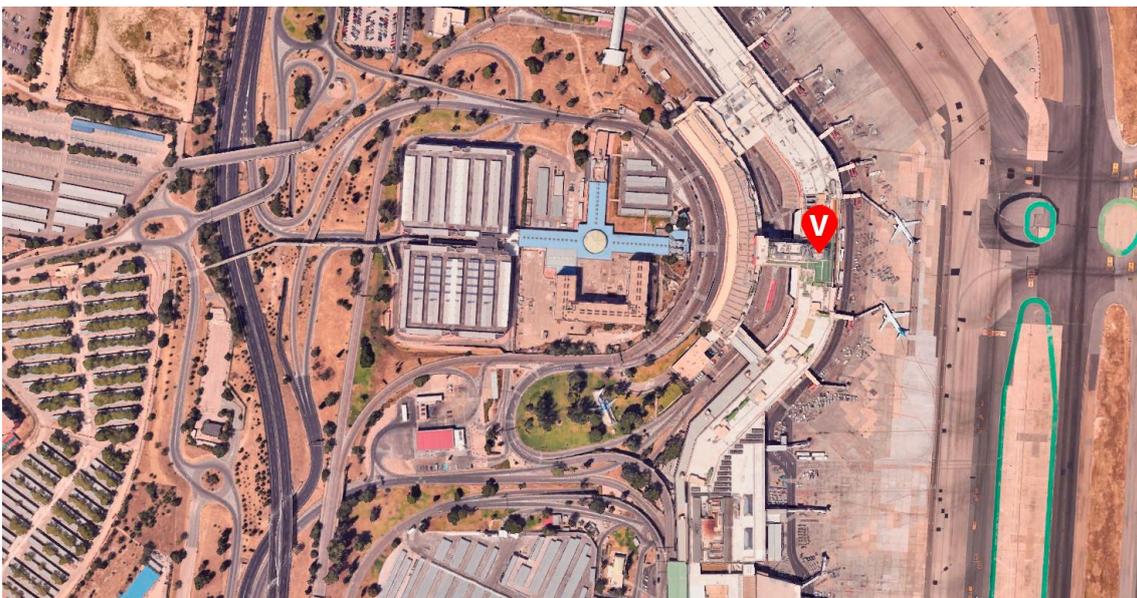


Imagen 17. Mapa aéreo del Aeropuerto Madrid-Barajas, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto.
(II)

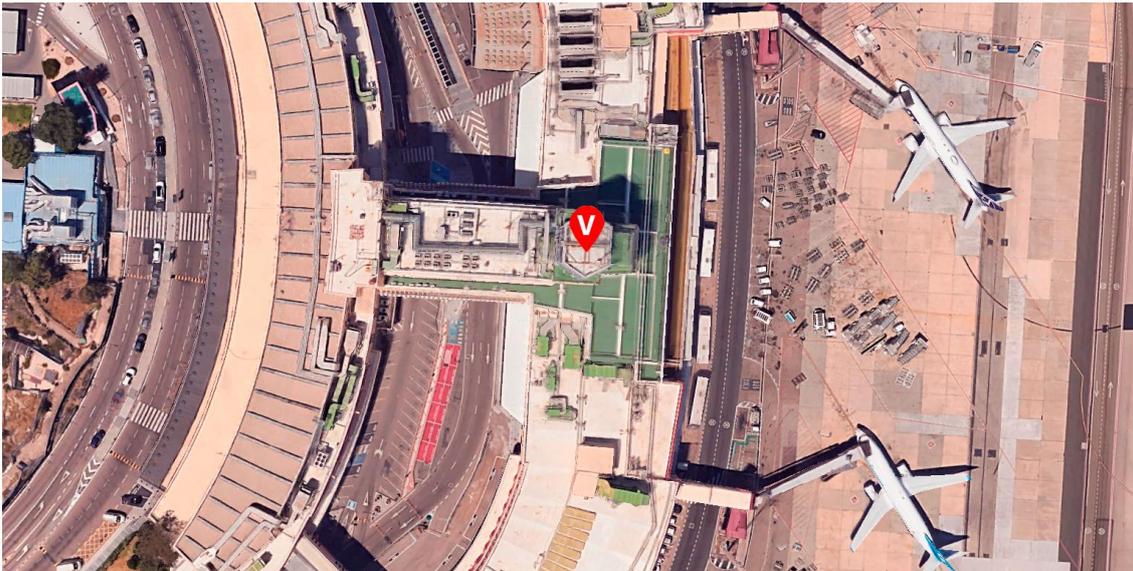


Imagen 18. Mapa aéreo del Aeropuerto Madrid-Barajas, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III)

- **Vertipuerto en Torre Picasso (Distrito Financiero)**
 - **Ubicación Exacta:** Azotea de la Torre Picasso, que ya tiene un Helipuerto en activo, adaptable para utilizarse como Vertipuerto.
 - **Servicios Cubiertos:**
 - Transporte de pasajeros on-demand (ejecutivos).
 - Transporte de carga urgente desde Mercamadrid.
 - **Justificación:** Alta densidad empresarial, oficinas y hoteles en la zona. Ideal para servicios premium y rápidos para clientes corporativos.

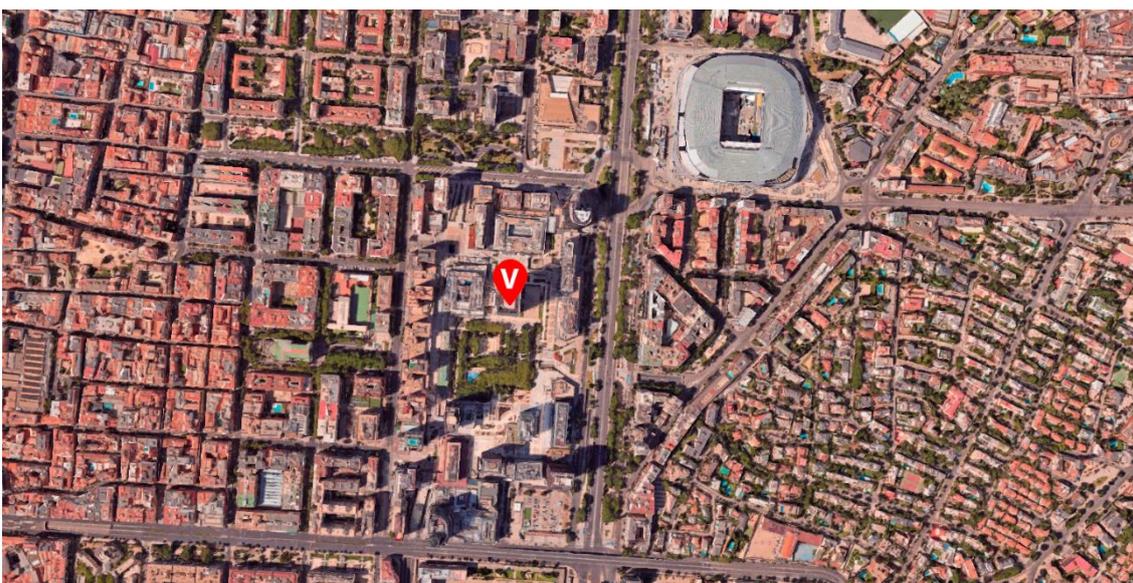


Imagen 19. Mapa aéreo del Distrito Financiero de Madrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (I)

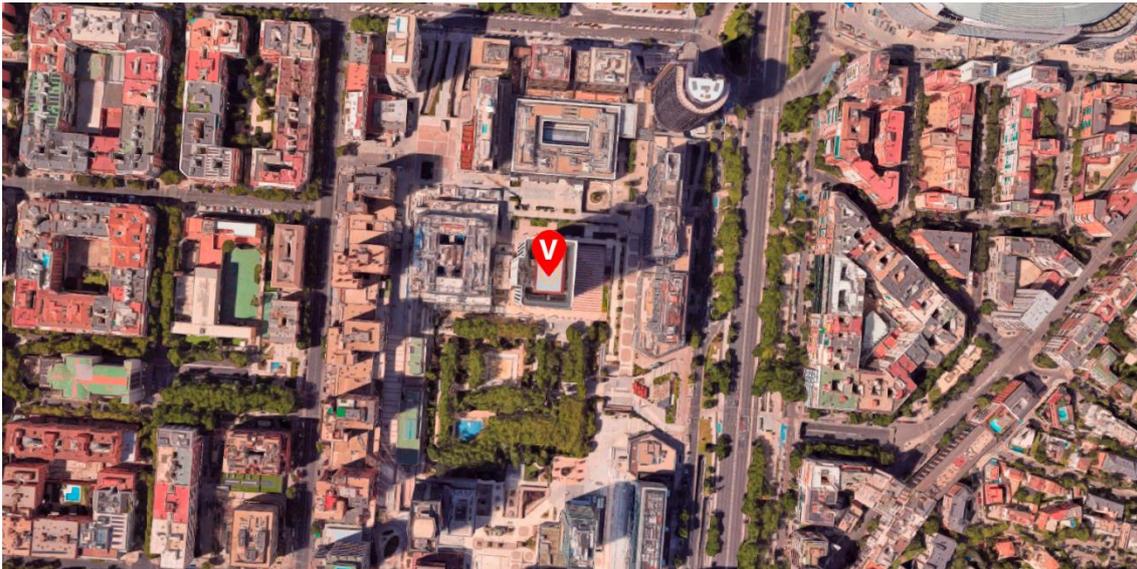


Imagen 20. Mapa aéreo del Distrito Financiero de Madrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (II)

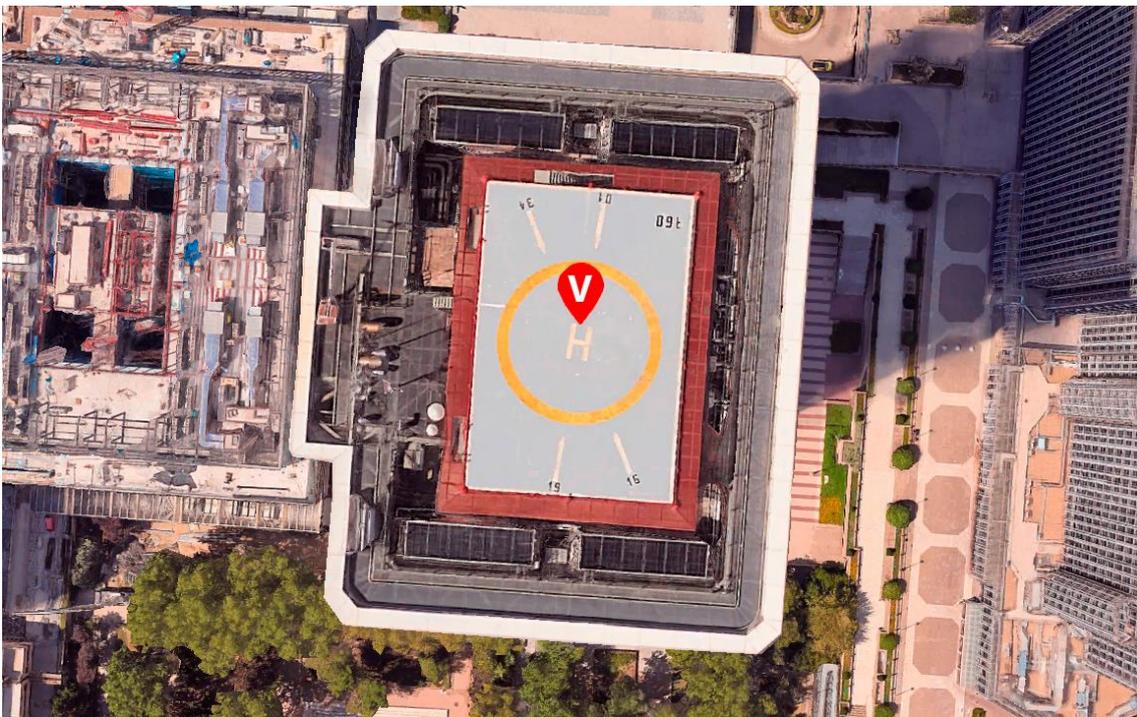


Imagen 21. Mapa aéreo del Distrito Financiero de Madrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III)

- **Vertipuerto en la Estación de Atocha**
 - **Ubicación Exacta:** Proximidades del área sur de la estación o azoteas del parking adyacente.
 - **Servicios Cubiertos:**
 - Conexiones intermodales (trenes AVE, cercanías, autobuses).
 - Transporte de carga (paquetería).

- **Justificación:** La estación de Atocha es un hub clave para la movilidad nacional e internacional, ofreciendo acceso directo a trenes de alta velocidad y transporte público.

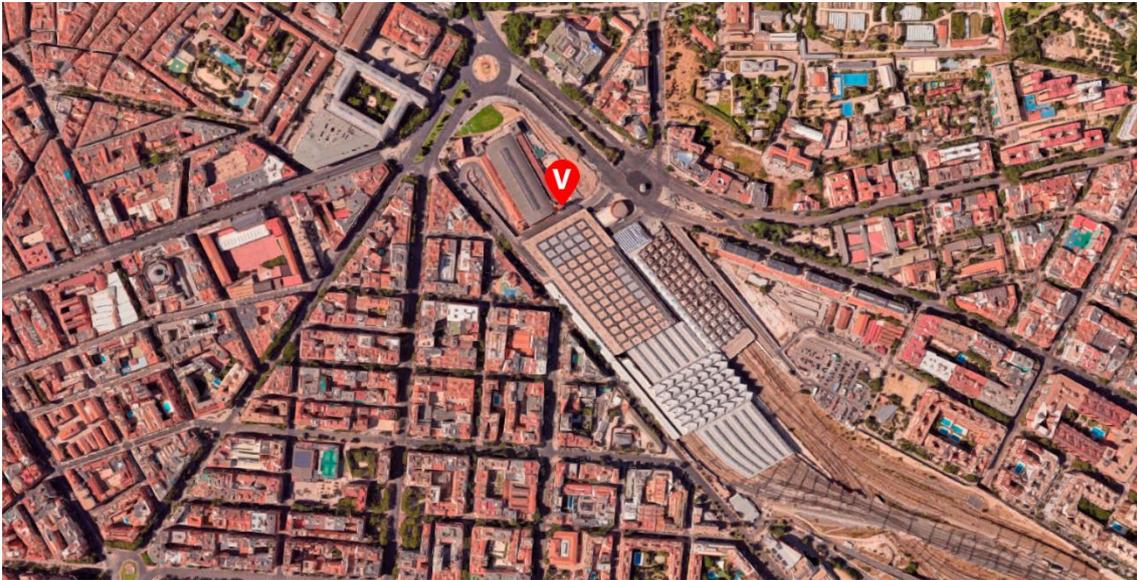


Imagen 22. Mapa aéreo de la estación de tren de Atocha, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (I)



Imagen 23. Mapa aéreo de la estación de tren de Atocha, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (II)



Imagen 24. Mapa aéreo de la estación de tren de Atocha, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III)

- **Vertipuerto en Mercamadrid**

- **Ubicación Exacta:** Dentro del complejo logístico de Mercamadrid, cerca de los centros de distribución principales. Se proponen dos ubicaciones distintas.
- **Servicios Cubiertos:**
 - Transporte de carga urgente.
- **Justificación:** Mercamadrid es el principal centro logístico de alimentos y bienes perecederos de la región, requiriendo tiempos de distribución optimizados.



Imagen 25. Mapa aéreo de Mercamadrid, con las ubicaciones propuestas aproximadas para el vertipuerto. (I)

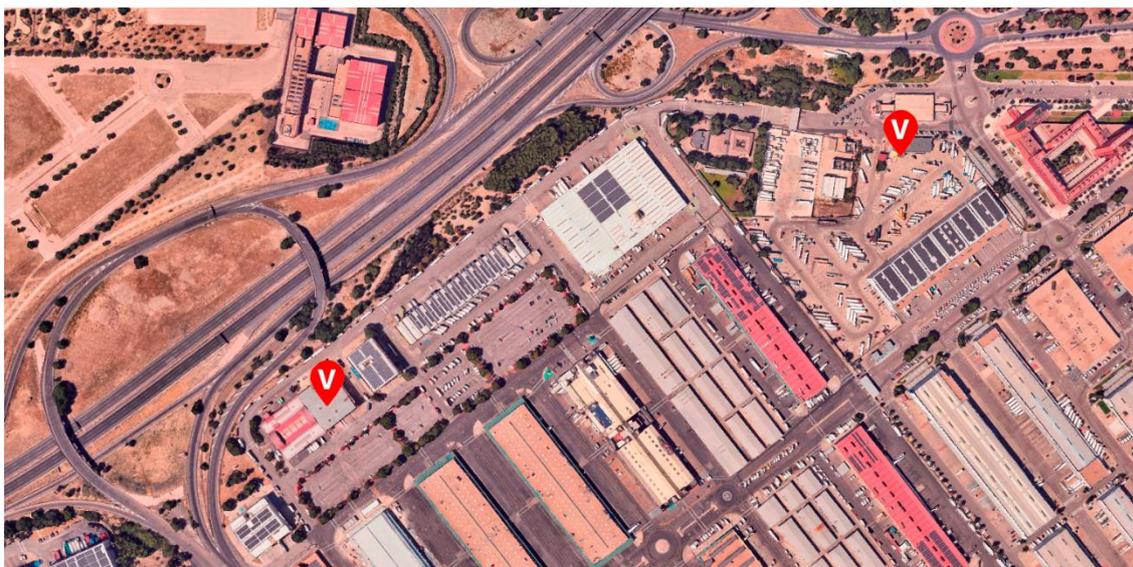


Imagen 26. Mapa aéreo de Mercamadrid, con las ubicaciones propuestas aproximadas para el vertipuerto. (II)

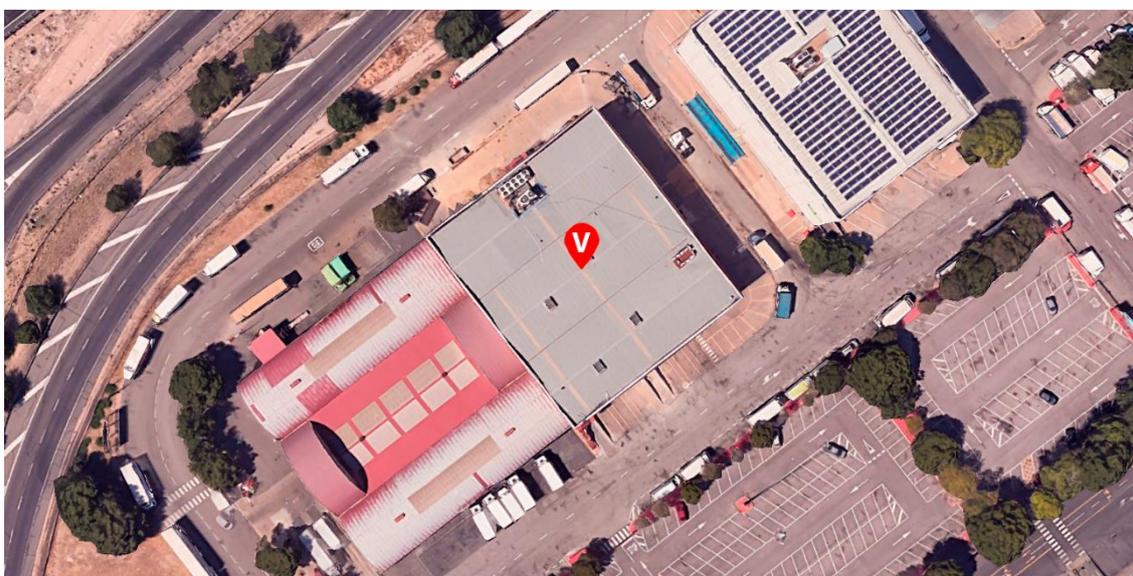


Imagen 27. Mapa aéreo de Mercamadrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (Ubicación I)



Imagen 28. Mapa aéreo de Mercamadrid, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (Ubicación II)

- **Vertipuerto en Madrid Río**
 - **Ubicación Exacta:** Próximo al Puente de Segovia, con espacio disponible en las márgenes del río o en techos de estructuras cercanas.
 - **Servicios Cubiertos:**
 - Turismo (vistas aéreas y recorridos panorámicos).
 - **Justificación:** Madrid Río es una zona turística y de ocio con alta afluencia de visitantes. Un vertipuerto aquí facilitará los servicios turísticos y será un punto atractivo para vuelos de experiencia.

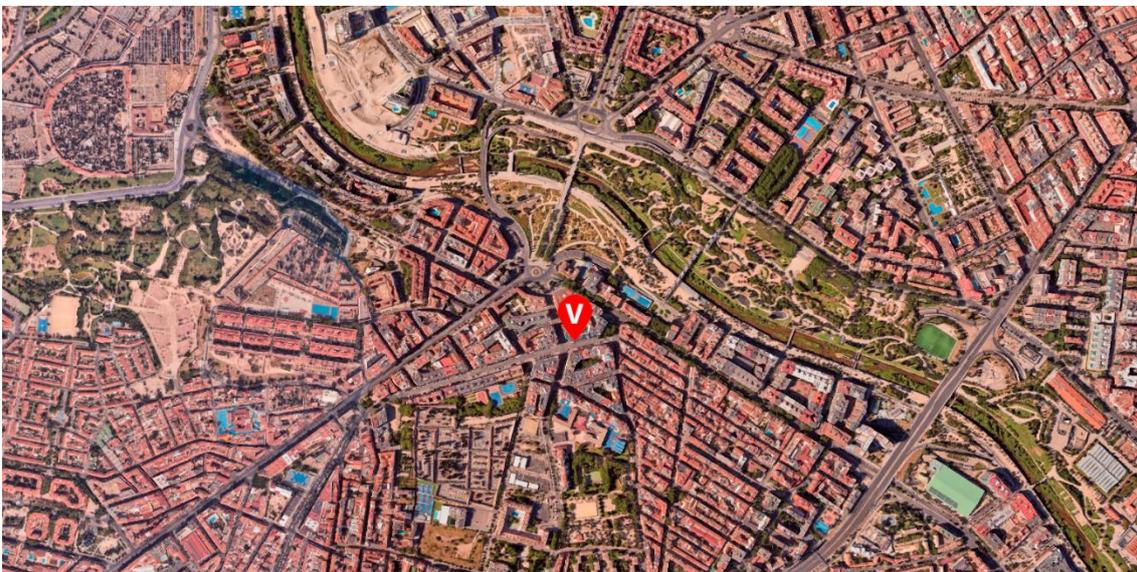


Imagen 29. Mapa aéreo de Madrid Río, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (I)



Imagen 30. Mapa aéreo de Madrid Río, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (II)



Imagen 31. Mapa aéreo de Madrid Río, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto. (III)

- **Vertipuerto en el Hospital Universitario La Paz**
 - **Ubicación Exacta:** Azotea del hospital o edificios adyacentes. Actualmente, al igual que el Hospital 12 de octubre, La Paz solo cuenta con una helisuperficie para casos de emergencia localizada en las inmediaciones del hospital, pero no con un helipuerto ni una infraestructura con este propósito.
 - **Servicios Cubiertos:**
 - Transporte médico de emergencia (órganos, medicamentos, personal sanitario).
 - Acceso rápido a hospitales desde zonas rurales
 - **Justificación:** La Paz es uno de los hospitales de referencia en Madrid, con alta demanda de transporte sanitario urgente.

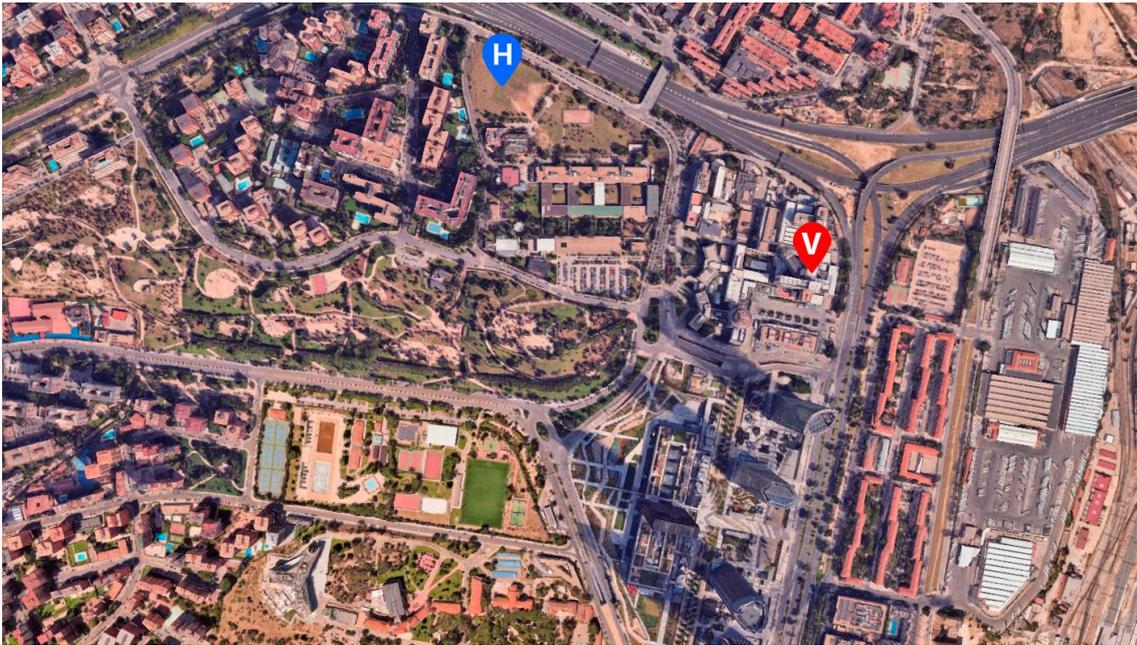


Imagen 32. Mapa aéreo del Hospital La Paz, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto y la actual helisuperficie utilizada en caso de emergencia.

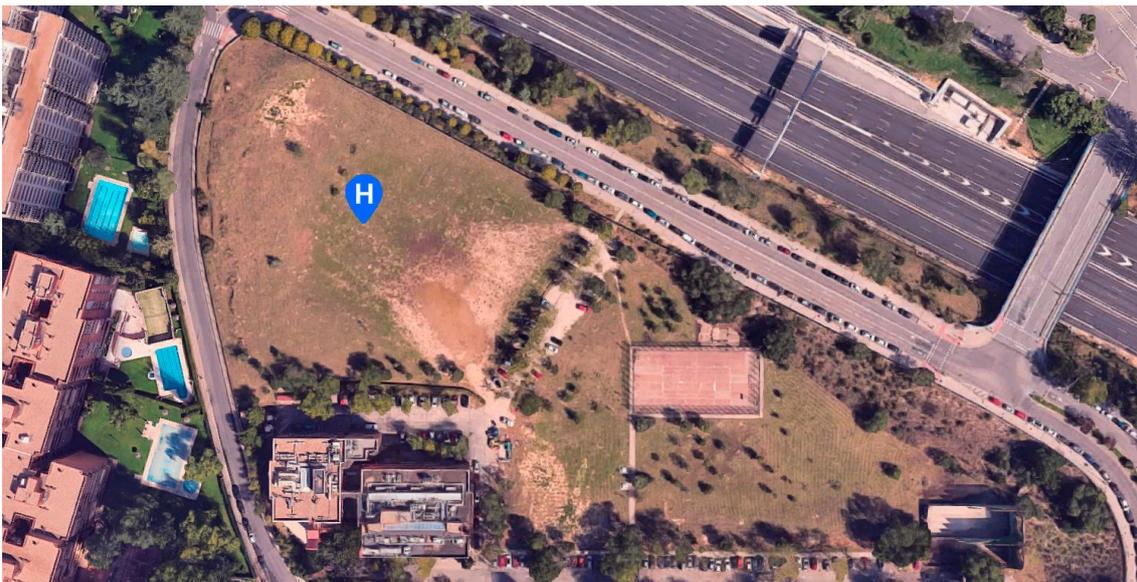


Imagen 33. Mapa aéreo del Hospital La Paz, con la actual helisuperficie utilizada en caso de emergencia.

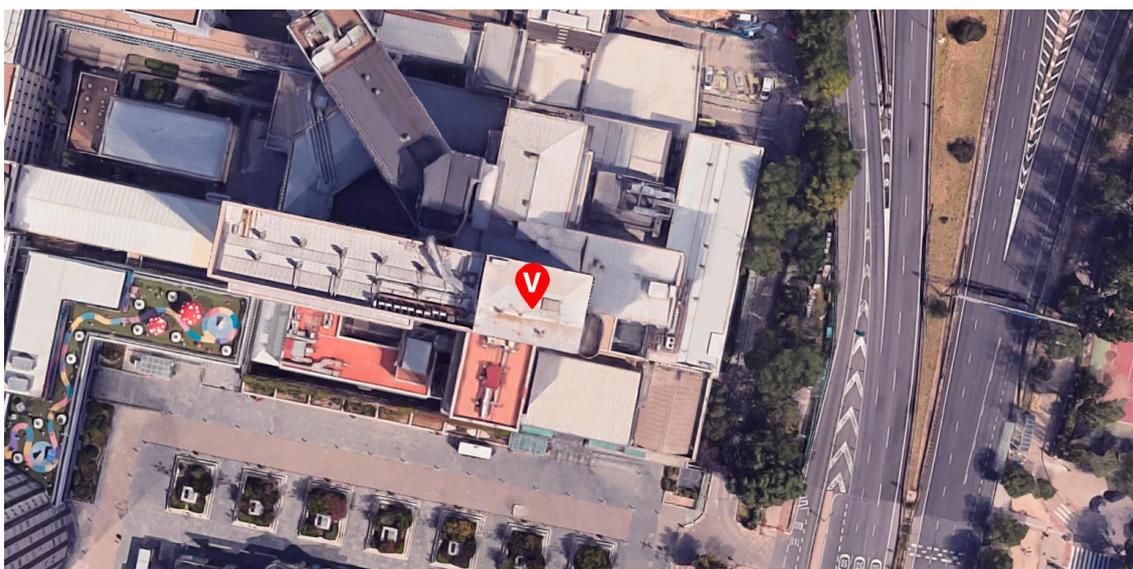


Imagen 34. Mapa aéreo del Hospital La Paz, con la ubicación propuesta aproximada para el vertipuerto.

A continuación, se presenta una tabla a modo de resumen con la red de vertipuertos propuesta y las rutas involucradas (desarrolladas en el apartado [Descripción de Ruta y Servicios Ofrecidos](#)):

Vertipuerto	Ubicación	Rutas Involucradas	Servicios Cubiertos
Aeropuerto	Adolfo Suárez Madrid-Barajas	RP01, RP02, RC02, RM01	Transporte de pasajeros, carga y servicios médicos.
Torre Picasso	Paseo de la Castellana	RP01, RC01	Transporte ejecutivo y carga urgente desde Mercamadrid.
Atocha	Estación de Atocha	RP02	Transporte intermodal (aero-taxi, carga).
Mercamadrid	Mercamadrid	RC01	Transporte de productos frescos y paquetería urgente.
Madrid Río	Madrid Río	RT01	Transporte turístico (vistas panorámicas).
Hospital La Paz	Chamartín	RM01	Transporte médico urgente (evacuaciones, órganos, medicinas).

Tabla 2. Resumen de la red de vertipuertos propuesta y las rutas involucradas.

El análisis de todas estas rutas y vertipuertos genera la imagen completa de los puntos de mayor rentabilidad, así como las dificultades que pueden surgir al proveer cada uno de los servicios propuestos.

5.1.2 Descripción de Rutas y Servicios Ofrecidos

Las rutas y servicios clave propuestos incluyen:

- **Transporte de Pasajeros:**
 - **Servicios On-demand:** Servicios de aero-taxi para trayectos cortos y de media distancia dentro de áreas urbanas y suburbanas.
 - **Ruta Propuesta:** Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas ↔ Torre Picasso.
 - **Justificación:** Conecta el aeropuerto con el distrito financiero y áreas con alta densidad de oficinas y hoteles. Ideal para ejecutivos y turistas que buscan una conexión rápida y privada.
 - **Frecuencia:** Programada cada 6-10 minutos durante las horas pico, basada en la capacidad operativa diaria y la demanda proyectada, asegurando un servicio eficiente y rentable.
 - **Distancia:** 11km
 - **Tiempo de viaje con el Joby S4:** 3 minutos
 - **Battery Swap con el Joby S4 tras:** 20 viajes

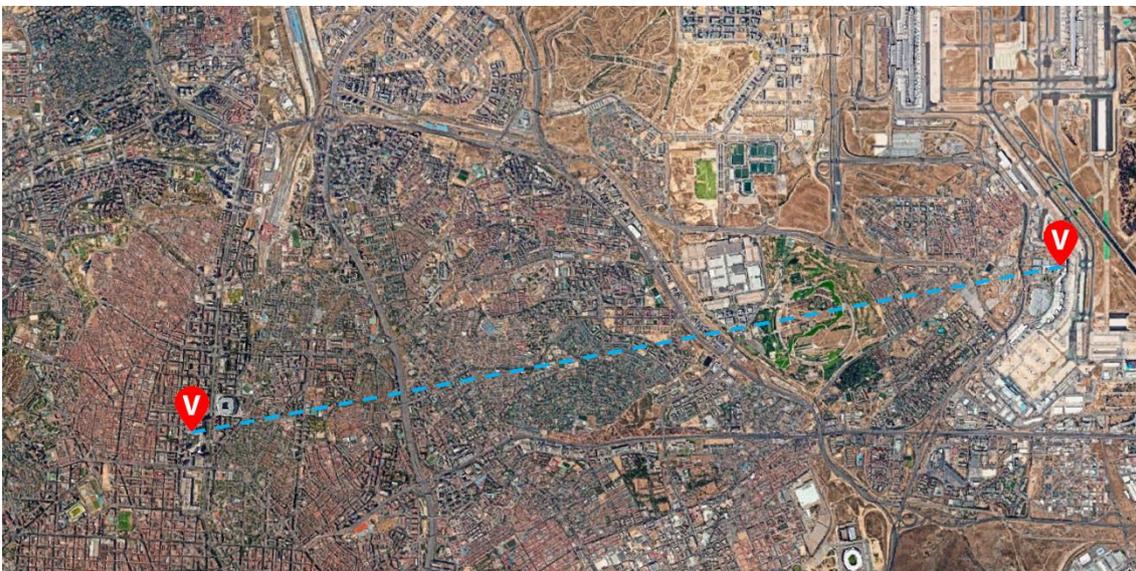


Imagen 35. Mapa aéreo de la ruta RP01 propuesta aproximada con los Vertipuestos involucrados.

- **Conexiones Intermodales Frecuentes:** Integración con estaciones de tren, autobuses y otros sistemas de transporte para facilitar la intermodalidad.
 - **Ruta Propuesta:** Estación de Atocha ↔ Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.
 - **Justificación:** La estación de Atocha es un hub intermodal clave en Madrid, conectando trenes de alta velocidad (AVE), líneas de cercanías y transporte urbano. Este servicio mejora la accesibilidad desde el aeropuerto hacia el sistema ferroviario nacional e internacional.
 - **Frecuencia:** Programada cada 5-10 minutos durante las horas operativas, en concordancia con la capacidad diaria de vuelos decidida. Además, se reforzará la publicidad y los avisos de transporte, destacando la conexión clara entre vuelos de avión

y viajes en tren para maximizar la intermodalidad y captar usuarios potenciales.

- **Distancia:** 12,4 km
- **Tiempo de viaje con el Joby S4:** 3 minutos
- **Battery Swap con el Joby S4 tras:** 19 viajes



Imagen 36. Mapa aéreo de la ruta RP02 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.

- **Viajes turísticos:** Servicios para explorar puntos de interés de la ciudad desde el aire
 - **Ruta Propuesta:** Salida desde Madrid Río y viaje aéreo por los alrededores de la ciudad volviendo al verti puerto de Madrid Río.
 - **Justificación:** Ruta panorámica que ofrece vistas aéreas de Madrid y sus alrededores, incluyendo puntos de interés cultural como Madrid Río, la Plaza Mayor, la Puerta del Sol, Cibeles, El Retiro, la Plaza de Toros, el estadio Santiago Bernabeu, las cuatro torres, el hipódromo de la zarzuela, la casa de campo, el Templo de Debod y el Palacio Real, entre otros.
 - **Frecuencia:** Tours de 30-60 minutos, principalmente los fines de semana y en temporada alta turística.
 - **Distancia:** 40 km
 - **Tiempo de viaje con el Joby S4:** Lento (en torno a 100 km/h): 30 minutos
 - **Battery Swap con el Joby S4 tras:** 12 viajes

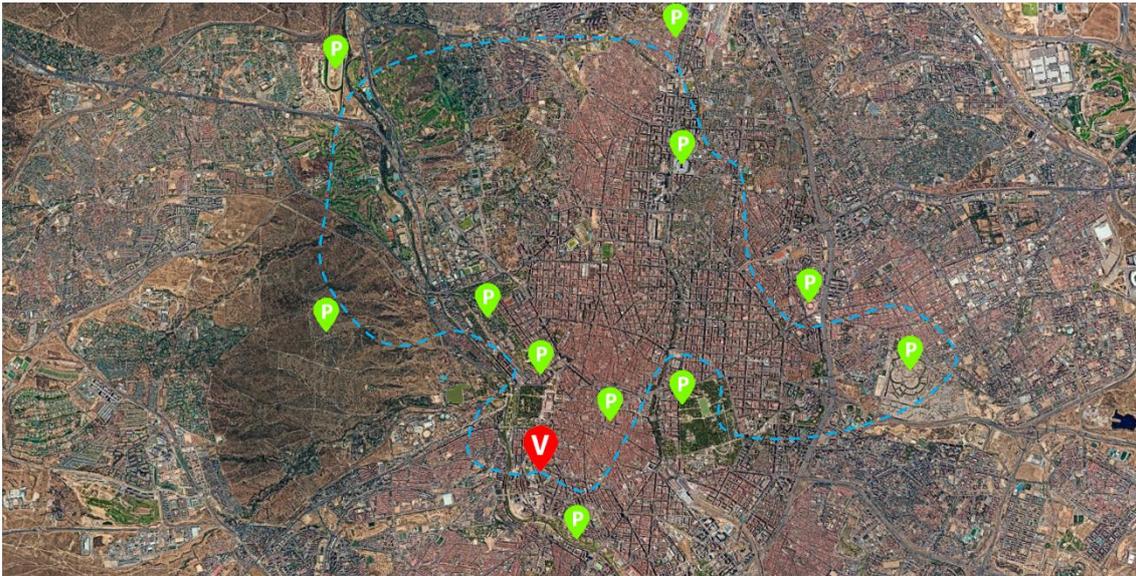


Imagen 37. Mapa aéreo de la ruta RT01 propuesta aproximada con los Vertipuestos involucrados.

- **Transporte de Carga:** Movilización de bienes y paquetería urgente, optimizando tiempos de entrega en comparación con el transporte terrestre.
 - **Ruta Propuesta 1:** Mercamadrid ↔ Torre Picasso.
 - **Justificación:** Distribución eficiente de productos frescos y paquetería urgente desde Mercamadrid hacia centros comerciales y empresariales clave. Reduce la congestión de tráfico y optimiza tiempos de entrega.
 - **Frecuencia:** Programada cada 10-15 minutos durante las horas operativas, garantizando un flujo continuo y eficiente en línea con la capacidad proyectada de vuelos diarios.
 - **Distancia:** 10 km
 - **Tiempo de viaje con el Joby S4:** 3 minutos
 - **Battery Swap con el Joby S4 tras:** 20 viajes

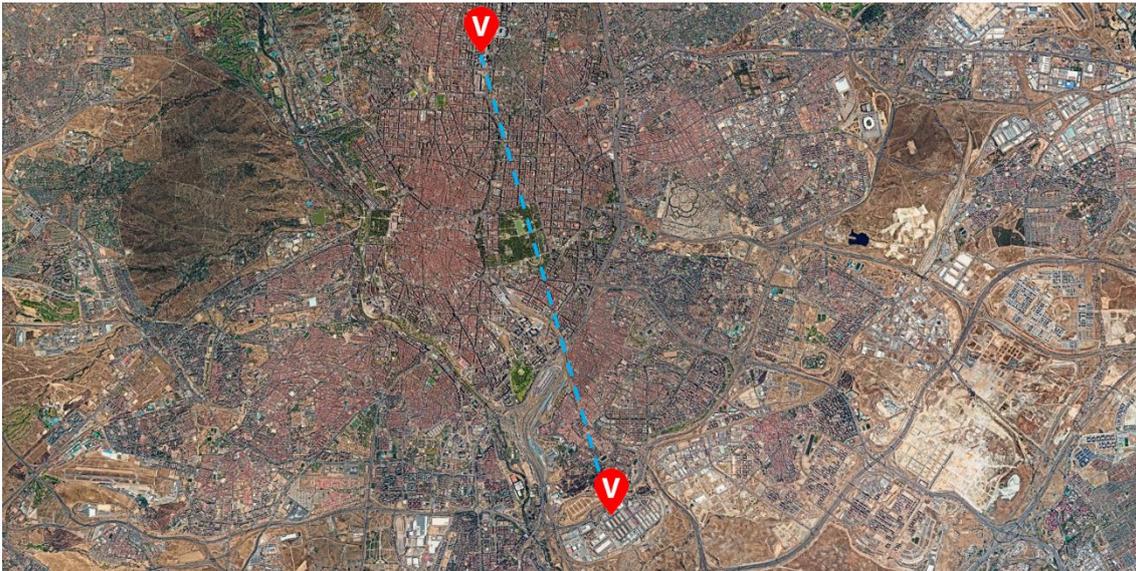


Imagen 38. Mapa aéreo de la ruta RC01 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.

- **Ruta Propuesta 2:** Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas ↔ Torre Picasso.
 - **Justificación:** Movilización rápida de bienes importados y exportados desde el aeropuerto hacia el centro de Madrid (Paquetería urgente, bienes premium, componentes electrónicos...etc)
 - **Frecuencia:** Bajo demanda. La demanda se gestionará mediante un sistema de reserva anticipada y algoritmos de optimización que ajusten la disponibilidad de vuelos según la demanda en tiempo real y los acuerdos logísticos, asegurando eficiencia operativa y maximización de ingresos.
 - **Distancia:** 11km
 - **Tiempo de viaje con el Joby S4:** 3 minutos
 - **Battery Swap con el Joby S4 tras:** 20 viajes

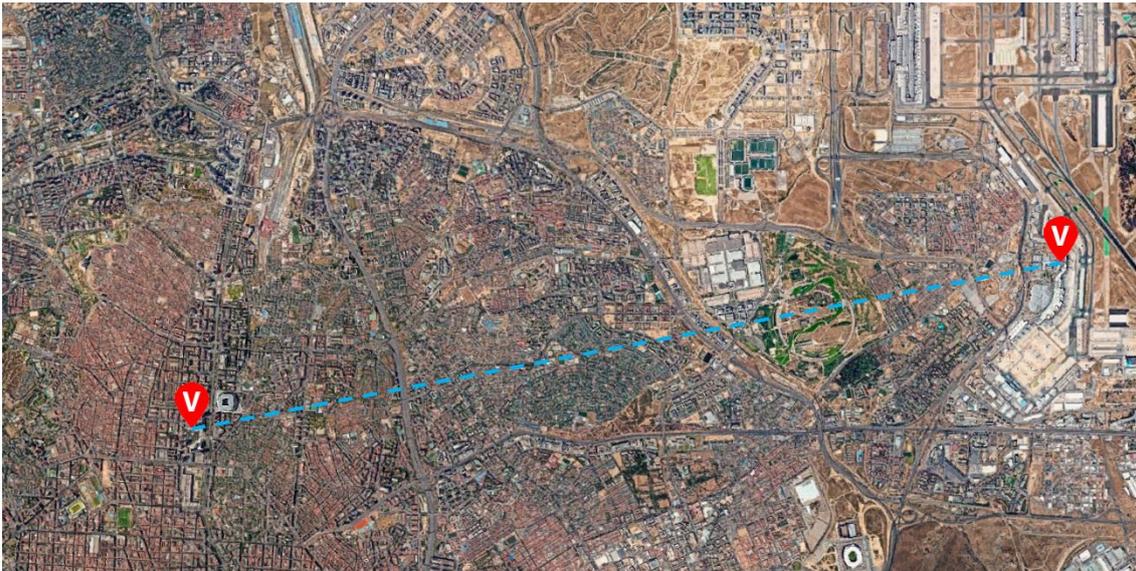


Imagen 39. Mapa aéreo de la ruta RC02 propuesta aproximada con los Vertipuertos involucrados.

- **Servicios Médicos y de Emergencia:** Soluciones de transporte rápido para medicinas o productos sanitarios, evacuaciones médicas y despliegue de personal sanitario.
 - **Ruta Propuesta:** Hospital La Paz ↔ Hospital 12 de Octubre ↔ Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.
 - **Justificación:** Conexión entre hospitales de referencia en Madrid y el aeropuerto para transporte de órganos, medicinas y evacuaciones médicas. Esta ruta prioriza la rapidez en casos críticos. El Hospital 12 de Octubre no cuenta con un helipuerto/vertipuerto. Pero sí que cuenta con una helisuperficie donde se pueden hacer transportes en ciertos casos.
 - **Frecuencia:** Bajo demanda, activada en casos de emergencia.
 - **Distancia 12 de Octubre a Barajas:** 15,2km
 - **Tiempo de viaje con el Joby S4:** 4 minutos
 - **Battery Swap con el Joby S4 tras:** 15 viajes

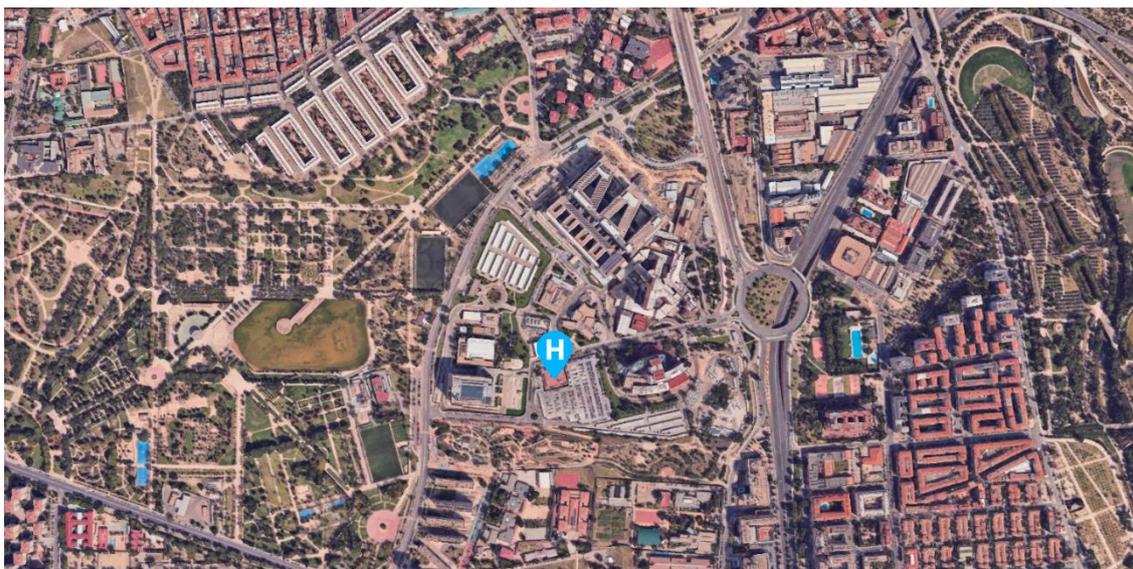


Imagen 40. Mapa aéreo del Hospital 12 de Octubre y su helisuperficie utilizada en caso de emergencia. (I)

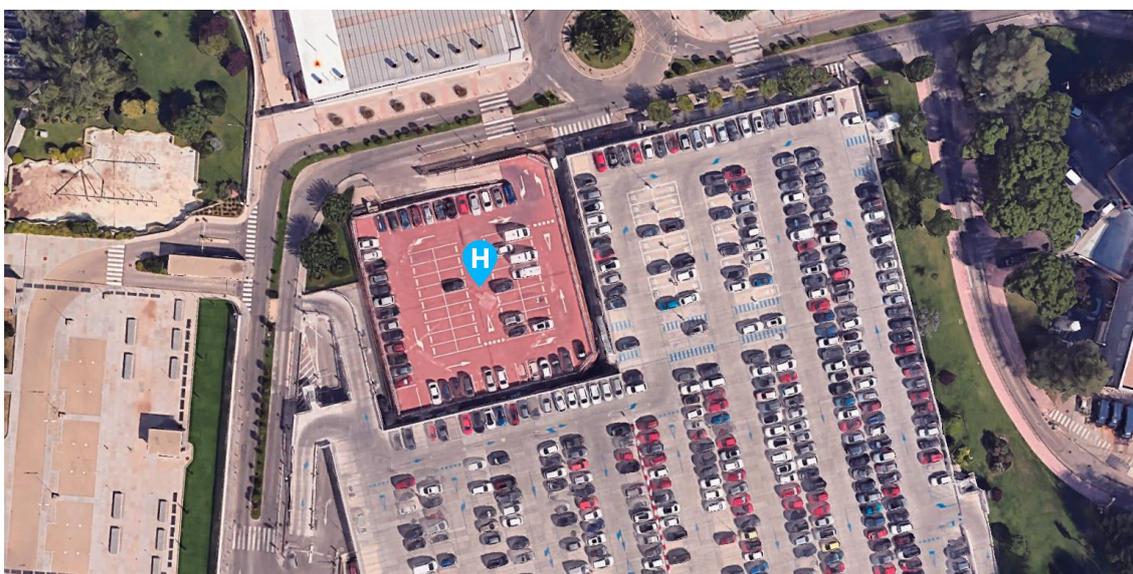


Imagen 41. Mapa aéreo del Hospital 12 de Octubre y su helisuperficie utilizada en caso de emergencia. (II)

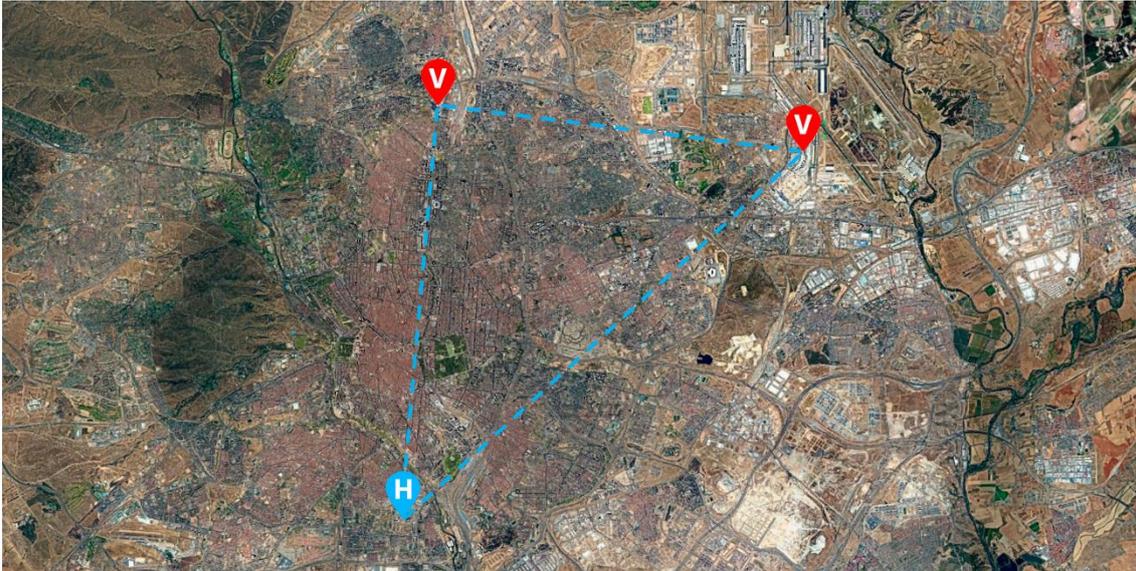


Imagen 42. Mapa aéreo de la ruta RM01 propuesta aproximada con los Vertipuertos / Helisuperficies involucrados.

A continuación, se presenta una tabla a modo de resumen de las rutas propuestas:

Nombre de la Ruta	Zona(s) sobrevolada(s)	Vertipuerto Involucrado 1	Vertipuerto Involucrado 2	Tipo de Servicio
RP01	Aeropuerto, Hortaleza, Chamartín	Aeropuerto	Torre Picasso	Transporte de pasajeros (On-demand)
RP02	Retiro, Centro, Hortaleza	Atocha	Aeropuerto	Transporte de pasajeros (Intermodal)
RT01	Madrid Río, Casa de Campo, Sierra de Guadarrama, Alrededores de Madrid	Madrid Río		Transporte de pasajeros (Turismo)
RC01	Mercamadrid, Vallecas, Retiro, Chamartín	Mercamadrid	Torre Picasso	Transporte de carga urgente
RC02	Aeropuerto, Hortaleza, Chamartín	Aeropuerto	Torre Picasso	Transporte de bienes importados/exportados

RM01	Chamartín, Tetuán, Usera	La Paz	Aeropuerto, Hospital 12 de Octubre	Servicios médicos de emergencia
-------------	--------------------------	--------	------------------------------------	---------------------------------

Tabla 3. Resumen de las rutas propuestas para la red.

Esta planificación inicial maximiza la utilización de rutas con alta demanda proyectada y menor riesgo operativo. Además, permite cubrir múltiples servicios en rutas compartidas, optimizando costos e infraestructura y se concentra en áreas estratégicas de Madrid con alta densidad de actividad económica, logística, y sanitaria. Por último, también proporciona cierta flexibilidad para ajustar las operaciones según el crecimiento de la demanda o la expansión futura e incluye cierta intercambiabilidad en los servicios ofertados y los eVTOLs involucrados en los mismos.

5.1.3 Segmentación de Clientes

La segmentación de clientes se define en función de los casos de uso de los servicios:

- **Empresas y Ejecutivos:** Corporaciones que buscan optimizar el tiempo de sus empleados o directivos en desplazamientos críticos mediante movilidad rápida y flexible para reuniones, visitas a clientes y traslados interurbanos.
- **Pasajeros de Aeropuertos:** Turistas y viajeros frecuentes que requieren una conexión eficiente entre el aeropuerto y la ciudad, reduciendo tiempos de traslado y evitando la congestión del tráfico terrestre.
- **Turistas y Viajeros Frecuentes:** Personas interesadas en experiencias turísticas únicas y soluciones rápidas para moverse entre puntos de interés, ofreciendo comodidad, vistas panorámicas y acceso exclusivo a destinos emblemáticos.
- **Hospitales, Gobiernos y Servicios de Salud:** Instituciones públicas y privadas que gestionan emergencias médicas o logísticas críticas, garantizando transporte inmediato para órganos, medicamentos o personal especializado.
- **Empresas Logísticas y de Carga:** Operadores logísticos, e-commerce y empresas que necesitan minimizar tiempos de distribución y maximizar la eficiencia en la logística urbana, especialmente para entregas de última milla y bienes críticos.
- **Usuarios Generales:** Ciudadanos que buscan alternativas sostenibles, modernas y rápidas al transporte convencional, disfrutando de movilidad eficiente dentro de áreas urbanas y suburbanas.

5.1.4 Propuesta de Valor para Cada Segmento

La propuesta de valor se personaliza según el tipo de cliente:

- **Empresas y Ejecutivos:** Ofrecemos reducción de tiempos de viaje en desplazamientos clave, con flexibilidad y adaptabilidad para itinerarios on-demand.
- **Pasajeros de Aeropuertos:** Brindamos un servicio eficiente que asegura conexiones rápidas entre el aeropuerto y la ciudad, reduciendo el estrés asociado a retrasos en transporte terrestre.
- **Turistas y Viajeros Frecuentes:** Ofrecemos experiencias exclusivas y memorables con vistas panorámicas, así como acceso rápido a destinos turísticos clave.

- **Hospitales, Gobiernos y Servicios de Salud:** Proporcionamos soluciones inmediatas para emergencias críticas, incrementando la capacidad de respuesta ante situaciones sanitarias urgentes.
- **Empresas Logísticas y de Carga:** Garantizamos la optimización de tiempos de entrega para bienes perecederos y paquetería urgente, con reducción de costos logísticos mediante rutas aéreas directas.
- **Usuarios Generales:** Ofrecemos una alternativa moderna y sostenible que complementa el transporte urbano, ayudando a ahorrar tiempo en trayectos cotidianos dentro de áreas urbanas.

5.1.5 Diferenciadores Clave

- **Velocidad y Eficiencia:** Reducimos drásticamente los tiempos de viaje comparado con transporte terrestre, ideal para rutas críticas durante horas pico o emergencias.
- **Sostenibilidad:** Usamos eVTOL eléctricos con bajas emisiones y niveles de ruido reducidos, contribuyendo a la movilidad sostenible en entornos urbanos.
- **Accesibilidad y Conectividad:** Integramos servicios con nodos de transporte clave como estaciones de tren y aeropuertos, ubicando vertipuertos estratégicamente para maximizar la cobertura.
- **Flexibilidad Operativa:** Ofrecemos servicios personalizados según demanda y necesidades específicas, con adaptabilidad a diferentes segmentos y horarios.
- **Experiencia de Usuario Superior:** Brindamos comodidad y exclusividad en cada trayecto, utilizando innovación tecnológica que mejora la percepción de calidad del servicio.

5.2 Análisis de Mercado y Demanda

La movilidad aérea urbana (UAM) está emergiendo como una solución innovadora para abordar la congestión del tráfico y mejorar la conectividad en entornos urbanos. Este análisis examina las tendencias actuales, la demanda potencial y los factores que influyen en la adopción de servicios de UAM y vertipuertos.

5.2.1 Tendencias Actuales en la Demanda de Servicios de UAM

A nivel global, la UAM ha captado la atención de gobiernos y empresas. Según un informe de Morgan Stanley [R5], se estima que el mercado de la UAM podría alcanzar un valor de 1,5 billones de dólares para 2040. En Europa, la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) prevé que las operaciones comerciales de UAM podrían iniciarse en un plazo de 3 a 5 años, con beneficios ambientales y ventajas para ciudadanos y empresas.

En España, iniciativas como el primer clúster nacional dedicado a la movilidad aérea innovadora (SIAM) demuestran un interés creciente en el desarrollo de la UAM [R6]. Además, se han realizado pruebas exitosas de prototipos de eVTOL, como el "Concept Integrity" de UMILES Next, que sobrevoló Jaén en octubre de 2022 [R7], y se prevé la publicación de un White Paper por parte de la SIAM en enero de 2025, ahondando en este tema.

5.2.2 Estudio de Mercado Local: Madrid

Madrid, como capital de España, presenta características que la hacen propicia para la implementación de servicios de UAM:

- **Densidad de Población:** Con más de 3,2 millones de habitantes en la ciudad y alrededor de 6,6 millones en la Comunidad de Madrid, la alta densidad poblacional genera una demanda significativa de soluciones de transporte eficientes.
- **Congestión del Tráfico:** Madrid ocupa el cuarto puesto en términos de congestión, con un nivel de congestión promedio del 23% [\[R8\]](#).
- **Turismo:** En 2019, Madrid recibió más de 7 millones de turistas [\[R9\]](#), lo que indica una demanda potencial para servicios de transporte rápidos y convenientes.

5.2.3 Factores que Impulsan o Limitan la Demanda

5.2.3.1 Impulsores:

- **Congestión Urbana:** La saturación del tráfico terrestre aumenta la necesidad de alternativas de transporte.
- **Avances Tecnológicos:** El desarrollo de eVTOL y sistemas de gestión del tráfico aéreo urbano (U-Space) facilita la implementación de la UAM.
- **Sostenibilidad:** La UAM ofrece una alternativa más ecológica en comparación con los vehículos tradicionales.

5.2.3.2 Limitantes:

- **Costes Operativos y de Infraestructura:** La inversión inicial es elevada, lo que puede retrasar la adopción.
- **Regulación y Normativas:** La falta de un marco regulatorio claro y avanzado puede obstaculizar el desarrollo.
- **Aceptación Pública:** Las preocupaciones sobre seguridad y ruido pueden influir en la adopción por parte de la población.

5.2.4 Proyección de la Demanda a Corto, Medio y Largo Plazo

La proyección de demanda a corto, medio y largo plazo para la movilidad aérea urbana (UAM) depende en gran medida de factores como la regulación, la madurez tecnológica de los eVTOLs, la disponibilidad de infraestructura (vertipuertos), y la aceptación pública.

- **Corto Plazo (1-3 años)**
 - En los próximos tres años, la adopción de UAM será experimental, limitada principalmente a proyectos piloto y demostraciones controladas. Las regulaciones aún se están elaborando, y tanto la EASA en Europa como la FAA en Estados Unidos están estableciendo marcos que aseguren operaciones seguras y escalables, aunque su implementación completa requerirá tiempo.
 - Durante este período, el desarrollo de la tecnología de los eVTOL y los sistemas de gestión de tráfico aéreo será clave. Los primeros proyectos piloto en ciudades seleccionadas se enfocarán en evaluar la viabilidad de la UAM en entornos urbanos, posicionando a los actores tempranos para entender mejor las condiciones de adopción y los requisitos técnicos necesarios.

- **Medio Plazo (3-7 años)**
 - A medida que la regulación e infraestructura comiencen a asentarse, se espera que algunas rutas estratégicas inicien operaciones comerciales limitadas, como servicios de traslado a aeropuertos y rutas turísticas en áreas pioneras. Sin embargo, el despliegue generalizado en redes urbanas de transporte seguirá siendo poco probable en esta fase debido a los altos costos de infraestructura, los requerimientos de carga rápida y la necesidad de mejoras tecnológicas en los eVTOL. Sin embargo, podría comenzar a verse la certificación oficial de los primeros eVTOLs.
 - Este período será esencial para que las empresas de UAM optimicen sus modelos de negocio y tecnología. La combinación de regulación en expansión y proyectos estratégicos bien posicionados permitirá sentar las bases de una estructura comercial viable, ofreciendo una oportunidad única para quienes ya estén preparados para escalar.
- **Largo Plazo (7-15 años)**
 - En el largo plazo, los servicios de UAM podrían madurar y expandirse a mayor escala, siempre que se superen los desafíos actuales. La reducción de costos de los eVTOL y una infraestructura urbana adaptada para los vertipuertos serán clave para lograr que la UAM se convierta en una parte integral del ecosistema de transporte urbano.
 - Las operaciones regulares en áreas urbanas y suburbanas serán posibles si las preocupaciones de ruido y privacidad se gestionan adecuadamente. En este horizonte, las ciudades que adapten su infraestructura y regulaciones podrían convertirse en hubs de movilidad aérea urbana, atrayendo a inversionistas y usuarios por igual.

En conclusión, aunque el crecimiento de la UAM estará marcado por desafíos en los próximos años, las tendencias actuales indican que el sector tiene un potencial inmenso para transformar el transporte urbano. La fase de desarrollo en la que se encuentra actualmente la UAM, con avances en regulación, tecnología y alianzas estratégicas, representa el momento ideal para establecerse en el mercado y garantizar una posición de liderazgo en el futuro. Con un timing adecuado y una colaboración efectiva con fabricantes, reguladores e inversores, este es el momento para maximizar la rentabilidad y capitalizar las oportunidades a largo plazo.

5.3 Estructura de Costes

La implementación de una red de vertipuertos en Madrid requiere un análisis detallado de los costes iniciales y operativos asociados a cada ubicación estratégica, en función de los servicios prestados. Este apartado desglosa la estimación de los costes clave, discretizado por conceptos, explicando las fuentes utilizadas y el rationale detrás de las diferencias entre vertipuertos y servicios prestados.

Se analizarán dos categorías principales: los costes iniciales, que incluyen diseño, construcción e implementación de tecnologías, y los costes operativos, relacionados con el mantenimiento, personal y servicios necesarios para garantizar el funcionamiento continuo. Estos valores han sido estimados considerando referencias de proyectos similares, adaptados a las características

únicas de cada vertipuerto, y proporcionan una base sólida para la planificación financiera del modelo de negocio. Para ello, se han recopilado datos de fuentes específicas que reflejan proyectos y estándares comparables.

5.3.1 Costes Iniciales

5.3.1.1 *Diseño y planificación*

Vertipuerto	Diseño y planificación (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	500.000
Picasso	450.000
Estación de Atocha	450.000
Mercamadrid	300.000
Madrid Río	350.000
Hospital Universitario La Paz	250.000

Tabla 4. Costes Iniciales de Diseño y Planificación en euros por Vertipuerto.

La estimación de los costes de diseño y planificación para cada vertipuerto se basa en la complejidad del proyecto, los servicios ofrecidos y los requisitos normativos específicos de cada ubicación. A continuación, se detallan los factores clave y rutas asociadas que justifican estos costes.

Para el vertipuerto del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, el coste más elevado de 500.000€ refleja la necesidad de estudios de viabilidad exhaustivos, diseño arquitectónico detallado y estrictas aprobaciones regulatorias al integrarse en un aeropuerto internacional, tal como indican las directrices de la AESA sobre nuevas infraestructuras aeroportuarias [\[R10\]](#) [\[R19\]](#). Se considera la integración de servicios de alta frecuencia y la complejidad de coordinar múltiples tipos de operaciones (pasajeros, carga y emergencias).

Los vertipuertos de Picasso y la Estación de Atocha, ambos ubicados en núcleos urbanos densos con conexiones intermodales significativas, tienen costes estimados de 450.000€ cada uno, considerando la complejidad urbanística y el cumplimiento normativo necesarios en entornos tan exigentes.

Por otro lado, el vertipuerto en Mercamadrid presenta un coste menor de 300.000€, debido a su ubicación en un centro logístico donde los desafíos de planificación e integración son menos pronunciados, según la experiencia de AERTEC en proyectos similares [\[R24\]](#).

El vertipuerto de Madrid Río se estima en 350.000€, ligeramente superior al de Mercamadrid, para abordar consideraciones ambientales y la integración en la zona.

Finalmente, el vertipuerto del Hospital Universitario La Paz tiene un coste estimado de 250.000€, reflejando una proporción de los costes de diseño y planificación basada en proyectos

de helipuertos hospitalarios similares, como el del Hospital Universitario Marqués de Valdecilla [\[R21\]](#), donde el diseño y la planificación constituyeron aproximadamente unos 280.000€, en torno al 25 - 35% del coste total del proyecto.

5.3.1.2 Construcción de Infraestructura

Vertipuerto	Construcción de Infraestructura (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	6.000.000
Picasso	5.500.000
Estación de Atocha	5.800.000
Mercamadrid	4.000.000
Madrid Río	4.500.000
Hospital Universitario La Paz	4.800.000

Tabla 5. Costes Iniciales de Construcción de Infraestructura en euros por Vertipuerto.

Los costes estimados para la construcción de la infraestructura de cada vertipuerto se han determinado en función de la complejidad del proyecto, la ubicación y los servicios ofrecidos. Se han tenido en cuenta también los requerimientos específicos de cada ruta que opera desde cada vertipuerto, así como la infraestructura adicional necesaria para implementar el sistema de Battery Swapping. Este sistema permite realizar una sustitución rápida de baterías. En lugar de cargar las baterías mientras están instaladas, se opta por reemplazarlas por otras ya cargadas para acelerar la operación y facilitar el mantenimiento. Una vez que el eVTOL aterriza, un equipo automatizado (o semi-automatizado) retira las baterías agotadas y las sustituye por baterías completamente cargadas. Para esto sería necesario incorporar al vertipuerto estaciones de intercambio y un almacén de baterías de repuesto, además de mecanismos semi-automatizados de manipulación de las mismas. Por último, se ha estudiado la instalación de un sistema de paneles solares para generación de energía, pero como se verá en el apartado de [Costes Operativos Anuales](#), el consumo de electricidad esperado es tan alto que la instalación de un sistema de este tipo haciendo hipótesis simples no merece la pena.

El vertipuerto en el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas presenta el coste más elevado de 6.000.000€, reflejando la necesidad de desarrollar plataformas de aterrizaje, áreas de espera y facilidades para pasajeros en un entorno aeroportuario de alta complejidad y regulación. Esta estimación se basa en el coste de construcción del Helipuerto de Algeciras, que superó los 7 millones de euros [\[R11.1\]](#). Los 6 millones de euros resultan ajustar la escala y especificidades del proyecto, teniendo en cuenta la economía de escala, los avances tecnológicos, las diferencias en diseño y funcionalidad, y la ubicación y accesibilidad (Al no encontrarse sobre una estructura existente en un puerto marítimo, como es el caso del Helipuerto de Algeciras).

El vertipuerto de Picasso, con un coste estimado de 5.500.000€, implica la adaptación del helipuerto existente en su azotea, incluyendo refuerzos estructurales significativos debido a la ubicación, la incorporación del sistema de Battery Swapping y la necesidad de cumplir con las

estrictas normativas de construcción. Esto se alinea con las indicaciones de Ingeniería Real sobre los costes de construcción de helipuertos elevados [\[R11.2\]](#), que pueden variar ampliamente dependiendo de los requerimientos específicos.

La Estación de Atocha tiene un coste estimado de 5.800.000€, considerando la integración del vertipuerto con un importante hub de transporte y las adaptaciones necesarias para armonizar con la infraestructura existente, lo cual añade complejidad y costes al proyecto.

Para Mercamadrid, hay que reflejar la necesidad de infraestructura especializada para operaciones logísticas y manejo eficiente de carga. En línea con el resto de vertipuertos, y basándose en experiencias de otras empresas en proyectos similares, el coste estimado es de 4.000.000€.

El vertipuerto en Madrid Río se estima en 4.500.000€, teniendo en cuenta la necesidad de una integración cuidadosa con el entorno urbano y turístico, sistemas más exigentes para tratar de aislar el ruido, así como consideraciones ambientales y normativas específicas de la zona.

Finalmente, para el vertipuerto del Hospital Universitario La Paz será necesario reflejar las particularidades de construir en un entorno hospitalario, donde se requieren instalaciones especializadas para servicios médicos y de emergencia. Este coste se compara con proyectos como la construcción de la helisuperficie del Hospital de Lebrija, que superó los 300.000€ [\[R22\]](#), o el del Hospital Universitario Marqués de Valdecilla, que superará los 50.000€ [\[R21\]](#). Ambos son hospitales y proyectos de mucha menor escala y complejidad, que no presentan tantos desafíos de integración ni requieren las capacidades operativas del potencial vertipuerto en el hospital La Paz. Además, la mayoría de helipuertos en hospitales han requerido una serie de adaptaciones y mejoras posteriores altamente costosas, y tampoco tenían requerimientos de seguridad y normativas como las que se encuentran en un proyecto de tal magnitud y complejidad. Es por todo ello que, para este vertipuerto, se estima un coste de 4.800.000€.

Las diferencias en los costes estimados entre los vertipuertos se justifican por los diversos niveles de complejidad, servicios prestados y requisitos específicos de cada ubicación, respaldados por las fuentes proporcionadas y las consideraciones de proyectos similares.

5.3.1.3 *Sistemas Tecnológicos*

Vertipuerto	Sistemas Tecnológicos (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	1.000.000
Picasso	800.000
Estación de Atocha	850.000
Mercamadrid	600.000
Madrid Río	600.000
Hospital Universitario La Paz	400.000

Tabla 6. Costes Iniciales de Sistemas Tecnológicos en euros por Vertipuerto.

La estimación de los costes para los sistemas tecnológicos en cada vertipuerto se fundamenta en la complejidad operativa, los servicios ofrecidos y la necesidad de integración con sistemas de gestión de tráfico aéreo y terrestre. El vertipuerto del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas presenta el coste más elevado de 1.000.000€, reflejando la implementación de avanzados sistemas de gestión de tráfico aéreo y U-Space, indispensables para operar en un entorno aeroportuario internacional de alta densidad, tal como destaca la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en sus normas y métodos recomendados [\[R12.1\]](#), [\[R12.2\]](#).

Los vertipuertos de Picasso y la Estación de Atocha tienen costes estimados de 800.000€ y 850.000€, respectivamente. Estas cifras se deben a la necesidad de sofisticados sistemas tecnológicos adaptados a entornos urbanos congestionados y a la integración con infraestructuras de transporte existentes, lo que incrementa la complejidad y los requerimientos tecnológicos. Mercamadrid y Madrid Río, con costes estimados de 600.000€ cada uno, requieren sistemas tecnológicos avanzados para gestionar operaciones logísticas y turísticas de manera eficiente y segura, aunque con una menor complejidad en comparación con los hubs intermodales más grandes.

El vertipuerto del Hospital Universitario La Paz se estima en 400.000€, ajustando el coste inicial para reflejar la necesidad de sistemas tecnológicos fiables y especializados para operaciones médicas de emergencia. Aunque el volumen de tráfico es menor, la criticidad de las operaciones exige tecnología de alta precisión y comunicación en tiempo real. Este ajuste asegura coherencia con los porcentajes de inversión tecnológica respecto al coste total de construcción en los demás vertipuertos, basándose en las directrices y recomendaciones de la OACI y en experiencias de proyectos hospitalarios similares [\[R12.1\]](#), [\[R12.2\]](#), [\[R25\]](#).

5.3.1.4 Equipos y Señalización

Vertipuerto	Equipos y Señalización (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	600.000
Picasso	550.000
Estación de Atocha	580.000
Mercamadrid	400.000
Madrid Río	450.000
Hospital Universitario La Paz	250.000

Tabla 7. Costes Iniciales de Equipos y Señalización en euros por Vertipuerto.

Los costes estimados para los equipos y señalización en cada vertipuerto se han ajustado para mantener coherencia con el estándar internacional que indica que estos componentes representan aproximadamente el 10% del coste total de construcción, tal como se menciona en

las directrices de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) [R13] y en los manuales técnicos disponibles [R14]. En el caso del vertipuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, el coste estimado de 600.000€ refleja la necesidad de instalaciones avanzadas de iluminación, señalización y equipos de seguridad para operar en un entorno aeroportuario internacional de alta complejidad y volumen de tráfico, asegurando el cumplimiento de estrictos estándares de seguridad y operatividad.

Para los vertipuertos de Picasso y la Estación de Atocha, con costes estimados de 550.000€ y 580.000€ respectivamente, se considera la integración de sistemas de ayudas visuales y equipos de seguridad adaptados a entornos urbanos densos y hubs intermodales, donde la precisión y fiabilidad de la señalización son cruciales para operaciones seguras. Mercamadrid y Madrid Río, estimados en 400.000€ y 450.000€, requieren equipos y señalización que, aunque menos complejos, deben garantizar operaciones eficientes en contextos logísticos y turísticos respectivamente, alineados con las necesidades específicas de sus servicios.

El vertipuerto del Hospital Universitario La Paz tiene un coste estimado de 250.000€, ajustado para reflejar la menor escala y complejidad operativa, pero asegurando que se cumplen los requisitos esenciales para operaciones médicas de emergencia, como iluminación para operaciones nocturnas y señalización clara para aterrizajes precisos en situaciones críticas. Este ajuste también se basa en referencias de proyectos similares en helipuertos hospitalarios, donde los costes de equipos y señalización son proporcionalmente menores pero igualmente vitales para la seguridad [R13], [R14].

Las diferencias en los costes entre los vertipuertos se justifican por las variaciones en los servicios prestados, la complejidad de las operaciones y las características específicas de cada ubicación. Al ajustar los costes para mantener una proporción coherente con los costes de construcción y las necesidades operativas, se asegura que cada vertipuerto esté equipado adecuadamente para su función prevista, manteniendo la seguridad y eficiencia operativa conforme a los estándares internacionales y las normativas aplicables.

5.3.1.5 Otros Costes (Contingencias)

Vertipuerto	Contingencias (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	1.215.000
Picasso	1.095.000
Estación de Atocha	1.152.000
Mercamadrid	795.000
Madrid Río	885.000
Hospital Universitario La Paz	855.000

Tabla 8. Costes Iniciales de Contingencias en euros por Vertipuerto.

La asignación de fondos para contingencias es una práctica estándar en proyectos de infraestructura, destinada a cubrir posibles desviaciones presupuestarias debido a imprevistos técnicos, ajustes de diseño o cambios en las condiciones durante la construcción. Es común reservar entre el 10% y el 20% del coste total estimado del proyecto para este concepto [R14]. En este análisis, se ha optado por asignar aproximadamente un 15% del coste total de cada vertipuerto para contingencias, reflejando un equilibrio razonable entre la previsión de riesgos y la optimización de recursos.

Las diferencias en los montos asignados a contingencias entre los distintos veripuertos corresponden proporcionalmente a sus costes totales estimados, que varían según la complejidad y escala de cada proyecto. Por ejemplo, el Vertipuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas tiene la asignación más alta de 1.215.000, acorde con su mayor coste total y la complejidad inherente a operar en un entorno aeroportuario internacional. En contraste, el Vertipuerto del Hospital Universitario La Paz, inicialmente subestimado, se ha ajustado a 855.000€ para mantener coherencia con el porcentaje estándar y reflejar adecuadamente los riesgos y requerimientos específicos de un entorno hospitalario crítico. Este enfoque asegura que cada proyecto disponga de una reserva financiera adecuada para afrontar posibles imprevistos, garantizando la viabilidad y el éxito de la implementación de la red de veripuertos.

5.3.1.6 Costes de los eVTOLs

El precio de un eVTOL como el Joby S4 puede variar según especificaciones y acuerdos comerciales. Aunque Joby Aviation no ha divulgado públicamente el costo exacto de su modelo S4, se estima que aeronaves de este tipo oscilan entre 1 y 3 millones de dólares. Por ejemplo, el Lilium Jet tiene un precio estimado de 2,5 millones de dólares, mientras que otros eVTOLs incluso superiores en algunas características, como el EH216-S de EHang se vende por unos 310.000€.

Teniendo en cuenta el tamaño total de la flota (22 eVTOLs), las cifras de referencia y los potenciales acuerdos comerciales. Se utilizará una estimación de precio unitario de 1 millón de euros por aeronave.

A continuación, se presenta con el número de eVTOLs utilizado en este análisis para cada una de las rutas, junto a su precio total:

Ruta	Número de eVTOLs	Inversión Total (€)
RP01 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	4	4.000.000
RP02 (Aeropuerto ↔ Estación de Atocha)	4	4.000.000
RC01 (Mercamadrid ↔ Torre Picasso)	4	4.000.000
RC02 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	4	4.000.000
RT01 (Madrid Río Ruta Turística)	4	4.000.000
RM01 (La Paz ↔ Barajas ↔ 12 de Octubre)	2	2.000.000

Tabla 9. Costes Iniciales de los eVTOLs en euros por Ruta.

5.3.2 Costes Operativos Anuales

5.3.2.1 Mantenimiento

Vertipuerto	Mantenimiento (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	600.000
Picasso	550.000
Estación de Atocha	580.000
Mercamadrid	400.000
Madrid Río	450.000
Hospital Universitario La Paz	240.000

Tabla 10. Costes Operativos Anuales de Mantenimiento en euros por Vertipuerto.

Los costes de mantenimiento anual para cada vertipuerto se han estimado aplicando un porcentaje del 5% al 10% sobre el coste total de construcción. Específicamente, se ha utilizado un 10% para tener en cuenta los costes operativos extra del mantenimiento del sistema de baterías.

Para el vertipuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, se ha asignado un coste de mantenimiento de 600.000€, que representa el 10% de su coste de construcción de 6.000.000€. Este porcentaje más elevado refleja la alta complejidad operativa y el volumen de tráfico esperado en un entorno aeroportuario internacional, donde el mantenimiento riguroso es clave para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones de pasajeros, carga y servicios médicos.

En el caso de Picasso y la Estación de Atocha, con costes de mantenimiento de 550.000€ y 580.000€ respectivamente, se aplica aproximadamente el 10% de sus costes de construcción. Estos vertipuertos, ubicados en entornos urbanos densos y sirviendo como hubs intermodales o financieros, requieren un mantenimiento constante y de alto nivel para asegurar la operatividad y seguridad en servicios premium y conexiones frecuentes.

Para Mercamadrid y Madrid Río, los costes de mantenimiento se estiman en 400.000€ y 450.000€, equivalentes también al 10% de sus costes de construcción. Mercamadrid, enfocado en operaciones logísticas, y Madrid Río, orientado al turismo, presentan una menor complejidad operativa que los hubs anteriores, pero aún requieren inversiones significativas en mantenimiento para garantizar servicios eficientes y seguros.

El vertipuerto del Hospital Universitario La Paz tiene un coste de mantenimiento ajustado a 240.000€, representando el 5% de su coste de construcción por su menor volumen de operaciones y teniendo en cuenta que está especializado en servicios médicos de emergencia y requiere disponibilidad continua, es por ello que el mantenimiento es esencial para asegurar esta disponibilidad y fiabilidad en situaciones críticas. Este porcentaje más bajo es coherente con su uso específico y las necesidades operativas del entorno hospitalario.

Las diferencias en los costes de mantenimiento entre los vertipuertos reflejan la variación en sus costes de construcción, complejidad operativa y servicios ofrecidos, asegurando estimaciones coherentes y realistas basadas en estándares industriales y referencias académicas.

Además, en cada uno de los vertipuertos operan una o más rutas. Estas rutas incluyen, por sus características, un coste de mantenimiento adicional intrínseco a su operación y a los eVTOLs. Este coste se ha estimado teniendo en cuenta el número de vuelos, la necesidad de operaciones continuas y el uso de equipos para carga y descarga de mercancías:

Ruta	Mantenimiento (€)
RP01 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	80.000
RP02 (Aeropuerto ↔ Estación de Atocha)	50.000
RC01 (Mercamadrid ↔ Torre Picasso)	40.000
RC02 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	30.000
RT01 (Madrid Río Ruta Turística)	25.000
RM01 (La Paz ↔ Barajas ↔ 12 de Octubre)	20.000

Tabla 11. Costes Operativos Anuales de Mantenimiento en euros por Ruta.

5.3.2.2 Energía y Servicios

A continuación, se presentan los costes operativos anuales de Energía y Servicios, exclusivamente para los vertipuertos:

Vertipuerto	Energía y Servicios (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	300.000
Picasso	270.000
Estación de Atocha	280.000
Mercamadrid	200.000
Madrid Río	200.000
Hospital Universitario La Paz	80.000

Tabla 12. Costes Operativos Anuales de Energía y Servicios en euros por Vertipuerto.

Se ha estudiado la instalación de paneles solares haciendo algunas hipótesis razonables:

- Superficie media de paneles solares de 100m²
- Eficiencia aproximada del 20%
- Radiación solar media en Madrid de 4,5 kWh/m²/día,

Con estos datos, se generarían en total unos 90 kWh/día/vertipuerto.

La mayoría de rutas tienen una alta frecuencia de vuelos y, por tanto, los vertipuertos requieren múltiples swaps diarios. Por ejemplo:

- RP01 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso): 240 vuelos diarios → 12 swaps diarios (240 / 20).
- RC01 (Mercamadrid ↔ Torre Picasso): 92 vuelos diarios → 5 swaps diarios (92 / 20).

Teniendo además en cuenta que la batería de cada Joby S4 tiene capacidad para unos 100 kWh, esto equivaldría a una necesidad de entre 500 y 1200 kWh diarios. Se concluye que:

- La inversión en infraestructura solar no se amortiza debido a su baja contribución relativa.
- La complejidad de instalación y mantenimiento en espacios urbanos limita la superficie disponible para paneles.
- La dependencia de energía solar introduce una variabilidad que no es ideal para operaciones críticas y de alta frecuencia.

Por estas razones, no es rentable ni eficiente instalar paneles solares en los vertipuertos para Battery Swapping. Es mejor optar por una conexión estable a la red eléctrica que garantice el suministro necesario para las operaciones.

Con esto en cuenta, los costes operativos anuales de energía y servicios para cada vertipuerto se han estimado en función del consumo eléctrico, agua y comunicaciones necesarios para su funcionamiento, considerando factores como la frecuencia de operaciones, la complejidad tecnológica y las necesidades específicas de cada ubicación.

Para el vertipuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, se ha mantenido un coste de 300.000 €, reflejando el uso intensivo de sistemas tecnológicos avanzados, iluminación y comunicaciones en un entorno aeroportuario internacional de alta actividad, tal como indican los datos de instalaciones similares proporcionados por AENA [\[R14\]](#), [\[R16\]](#).

En el caso de la Estación de Atocha, el coste estimado es de 280.000 €, ligeramente superior al de Picasso, debido a su función como hub intermodal que integra servicios ferroviarios, de autobuses y transporte urbano, lo que implica un mayor consumo energético para sistemas de coordinación y gestión de alto volumen de pasajeros.

El vertipuerto de Picasso, con un coste ajustado a 270.000 €, refleja el consumo energético asociado a operaciones de transporte de pasajeros on-demand y turismo de lujo en un entorno urbano denso y corporativo, pero con una frecuencia de operaciones ligeramente inferior a la de Atocha.

Para Mercamadrid y Madrid Río, se han mantenido costes de 200.000 € cada uno, coherentes con su escala operativa y uso específico. Mercamadrid, como centro logístico, requiere energía para operaciones de carga y gestión logística, mientras que Madrid Río, orientado al turismo, tiene un consumo energético asociado a servicios turísticos y de ocio, ambos con una frecuencia de operaciones moderada y menor complejidad tecnológica en comparación con los hubs intermodales más grandes.

El vertipuerto del Hospital Universitario La Paz se ha ajustado a 80.000 € para reflejar adecuadamente el consumo energético necesario para mantener sistemas operativos y de comunicación siempre disponibles para emergencias médicas, aunque su frecuencia de operaciones es menor en comparación con otros vertipuertos. Este ajuste asegura coherencia con las necesidades operativas de un entorno hospitalario crítico y se basa en estimaciones de consumo energético de instalaciones hospitalarias con helipuertos [R14].

Las diferencias en los costes entre los vertipuertos se justifican por la variación en la frecuencia y tipo de operaciones, la complejidad tecnológica y las necesidades energéticas específicas de cada ubicación. Estas estimaciones buscan ser coherentes y realistas, basadas en tarifas actuales y consumos promedio en instalaciones similares, asegurando que cada vertipuerto disponga de los recursos necesarios para operar eficientemente dentro del modelo de negocio propuesto.

A su vez, existen también unos costes intrínsecos a la operación de las rutas. Estos costes están asociados directamente con el consumo energético derivado del Battery Swapping en cada ruta y no deben duplicarse con los costes de los vertipuertos. Aquí se considera:

- Número total de vuelos anuales por ruta.
- Battery Swaps necesarios (100 kWh por swap).
- Precio de la energía: 0,15 €/kWh.

Ruta	Vuelos Anuales	Swaps Totales	Consumo Neto (kWh)	Coste Energía (€)
RP01 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	48,000	2,400	240.000	36.000
RP02 (Atocha ↔ Aeropuerto)	48,000	2,526	252.600	37.890
RT01 (Madrid Río Turística)	8,092	674	67.400	10.110
RC01 (Mercamadrid ↔ Torre Picasso)	27,600	1,380	138.000	20.700
RC02 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	46,000	2,300	230.000	34.500
RM01 (La Paz ↔ 12 de Octubre)	1,825	122	12.100	1.815

Tabla 13. Costes Operativos Anuales de Energía en euros por Ruta.

5.3.2.3 Personal

Vertipuerto	Personal Estimado (Empleados)	Coste Total (€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	12 empleados: 4 técnicos de mantenimiento, 4 coordinadores de operaciones, 2 de seguridad, 2 administrativos.	720.000

Torre Picasso	8 empleados: 3 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones, 3 de seguridad.	480.000
Estación de Atocha	8 empleados: 3 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones, 2 de seguridad, 1 administrativo.	480.000
Mercamadrid	8 empleados: 3 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones, 2 de seguridad, 1 logístico.	480.000
Madrid Río	6 empleados: 2 técnicos de mantenimiento, 2 de seguridad, 2 de atención al cliente.	360.000
Hospital Universitario La Paz	5 empleados: 2 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones, 1 de seguridad.	300.000

Tabla 14. Costes Operativos Anuales de Personal en euros por Vertipuerto.

El coste operativo anual de personal se ha estimado considerando un salario promedio de 60.000€ por empleado, coherente con las estructuras salariales de operadores, técnicos y personal administrativo en el sector del transporte aéreo y operaciones de helipuertos en España [R20]. Este salario refleja la necesidad de contar con personal altamente cualificado para garantizar la seguridad y eficiencia en las operaciones de los vertipuertos. También se han tenido en cuenta las especificidades de cada vertipuerto, como el tipo y frecuencia de los servicios ofrecidos.

Para el vertipuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, se ha estimado una plantilla de 12 empleados distribuidos en dos turnos de 8 horas, totalizando 720.000 €. Esta cifra se justifica por la complejidad y volumen de operaciones, que incluyen transporte de pasajeros on-demand, conexiones intermodales, transporte de carga y servicios médicos. El personal asignado incluye 4 técnicos de mantenimiento, 4 coordinadores de operaciones, 2 de seguridad y 2 administrativos.

En el vertipuerto de Torre Picasso, con un coste total de 480.000 €, se ha estimado un equipo de 8 empleados en dos turnos de 8 horas. Dada su ubicación en el distrito financiero y sus servicios de transporte de pasajeros ejecutivos y turismo de lujo, el personal incluye 3 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones y 3 de seguridad.

La Estación de Atocha cuenta con 8 empleados, con un coste de 480.000 €. El personal gestiona las conexiones intermodales y el transporte de carga, coordinando con otros modos de transporte y manejando un flujo constante de pasajeros y mercancías. El equipo está compuesto por 3 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones, 2 de seguridad y 1 administrativo.

En Mercamadrid, con un coste de 480.000 €, el personal se enfoca en operaciones logísticas y distribución de carga urgente. El equipo incluye 3 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones, 2 de seguridad y 1 logístico.

Para el vertipuerto de Madrid Río, con un coste total de 360.000 €, se asignan 6 empleados para cubrir operaciones turísticas durante fines de semana y temporadas altas. El personal incluye 2 de seguridad, 2 técnicos de mantenimiento y 2 de atención al cliente.

Finalmente, el vertipuerto del Hospital Universitario La Paz requiere un equipo de 5 empleados, con un coste total de 300.000 €. Aunque las operaciones son bajo demanda y enfocadas en emergencias médicas, se mantiene personal disponible las 24 horas para responder a situaciones críticas. La plantilla incluye 2 técnicos de mantenimiento, 2 coordinadores de operaciones y 1 de seguridad.

Las diferencias en el número de empleados y los costes entre los vertipuertos reflejan las particularidades de los servicios ofrecidos, la frecuencia de las operaciones y las necesidades específicas de cada ubicación. Se ha considerado cuidadosamente la carga operativa y las funciones requeridas para garantizar que el personal estimado sea suficiente para mantener operaciones seguras y eficientes, asegurando coherencia y realismo en las estimaciones de costes.

A su vez, también existen costes asociados al personal necesario para operar las rutas. Dado que el mantenimiento se centraliza en los vertipuertos, las rutas solo requieren pilotos para los vuelos y, en el caso de la ruta turística, guías turísticos adicionales:

Ruta	Personal Necesario (Empleados)	Coste Total (€)
RP01 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	8 pilotos.	480.000 €
RP02 (Aeropuerto ↔ Estación de Atocha)	8 pilotos.	480.000 €
RT01 (Madrid Río Turística)	8 pilotos, 8 guías turísticos (fines de semana).	480.000 €
RC01 (Mercamadrid ↔ Torre Picasso)	8 pilotos.	480.000 €
RC02 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso)	8 pilotos.	480.000 €
RM01 (Hospital La Paz ↔ Aeropuerto)	6 pilotos.	360.000 €

Tabla 15. Costes Operativos Anuales de Personal en euros por Ruta.

5.3.2.4 Seguridad y Seguros

Vertipuerto	Seguridad y Seguros (€)
-------------	-------------------------

Adolfo Suárez Madrid-Barajas	400.000
Picasso	350.000
Estación de Atocha	370.000
Mercamadrid	250.000
Madrid Río	250.000
Hospital Universitario La Paz	90.000

Tabla 16. Costes Operativos Anuales de Seguridad y Seguros en euros por Vertipuerto.

Los costes operativos anuales de seguridad y seguros para cada vertipuerto se han estimado considerando los riesgos operativos específicos asociados a su ubicación y los servicios ofrecidos, en línea con las normativas españolas que exigen planes de protección específicos para instalaciones críticas [R18]. Se incluyen los siguientes seguros indispensables en el desglose de costos:

- Seguro de Responsabilidad Civil General y Aeronáutica: Obligatorio para cubrir posibles daños a terceros durante las operaciones en cada vertipuerto. Este seguro asegura la protección frente a reclamaciones de pasajeros, personal y terceros afectados por las operaciones.
- Seguro de Accidentes Laborales: Garantiza la cobertura obligatoria para el personal operativo en cada instalación, en cumplimiento de la legislación laboral española.
- Seguro de Daños a la Propiedad: Protege las infraestructuras de los vertipuertos contra siniestros como incendios, vandalismo o fenómenos naturales, asegurando la sostenibilidad financiera.
- Seguro de Transporte de Mercancías (aplicable en Barajas y Mercamadrid): Cubriendo la movilización de bienes y paquetería, especialmente perecederos y de alto valor.
- Seguro de Transporte Sanitario (aplicable en La Paz): Necesario para garantizar la cobertura de operaciones críticas como el transporte de órganos, pacientes y medicamentos.

Para el vertipuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, el coste de 400,000 € refleja la alta criticidad y complejidad de operar en un entorno aeroportuario internacional con un gran volumen de pasajeros, carga y servicios médicos. La necesidad de múltiples seguros esenciales y medidas de seguridad robustas incrementa los gastos operativos.

En el caso de Picasso y la Estación de Atocha, con costes estimados de 350,000 € y 370,000 € respectivamente, se consideran las altas densidades de personas y la complejidad de las operaciones en entornos urbanos y hubs intermodales. Ambos requieren seguros de responsabilidad ampliados y cobertura específica para gestionar riesgos derivados del alto volumen de operaciones y la proximidad a áreas concurridas.

Mercamadrid y Madrid Río, con costes de 250,000 € cada uno, están alineados con sus operaciones especializadas en logística y turismo, donde los riesgos son menores. Sin embargo,

siguen exigiendo seguros generales y específicos que protejan bienes y usuarios durante las operaciones.

El vertipuerto del Hospital Universitario La Paz, con un coste ajustado a 90,000 €, refleja las necesidades específicas de un entorno hospitalario crítico. Aunque el volumen de operaciones es menor y enfocado en emergencias médicas, los seguros esenciales, como el de transporte sanitario, son indispensables para garantizar la seguridad de los pacientes, personal y equipos transportados.

Las diferencias entre los costes de los vertipuertos se explican por la variación en los riesgos operativos, la frecuencia de las operaciones y los servicios específicos ofrecidos, asegurando estimaciones coherentes y adaptadas a las necesidades de cada ubicación. Estas proyecciones están fundamentadas en normativas aplicables y referencias de costos [\[R14\]](#), [\[R17\]](#).

5.3.3 Costes Totales

5.3.3.1 Costes Iniciales Totales

A continuación, se presentan una tabla y un gráfico resumen de los costes iniciales totales de cada vertipuerto.

Vertipuerto	Costes Iniciales Totales (k€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	8.100
Picasso	7.300
Estación de Atocha	7.680
Mercamadrid	5.300
Madrid Río	5.900
Hospital Universitario La Paz	5.700

Tabla 17. Costes Iniciales Totales de cada Vertipuerto en k€.

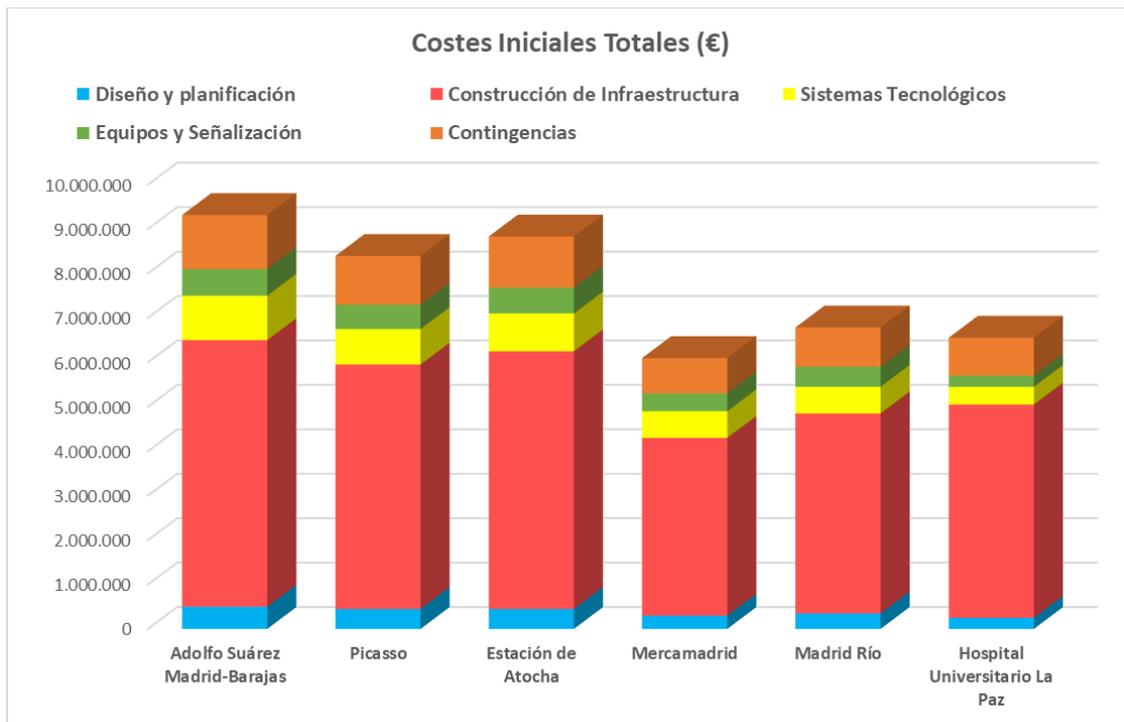


Imagen 43. Costes Iniciales Totales de cada Vertipuerto en €.

Se incluye también una tabla y un gráfico con la contribución de los distintos conceptos a los costes iniciales totales de los vertipuertos:

Concepto	Porcentaje sobre los Costes Totales (%)
Diseño y Planificación	5,00
Construcción de Infraestructura	66,56
Sistemas Tecnológicos	9,24
Equipos y Señalización	6,16
Contingencias	13,04

Tabla 18. Distribución de cada concepto a los Costes Iniciales Totales.

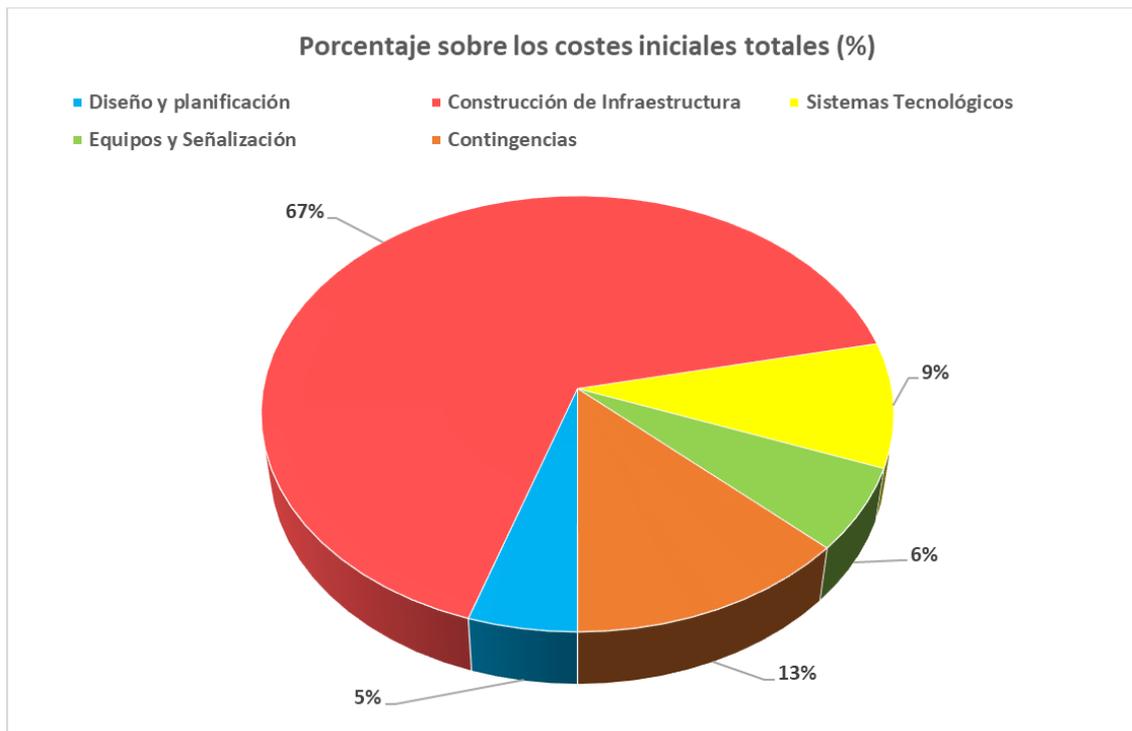


Imagen 44. Distribución de cada concepto a los Costes Iniciales Totales.

Los costes iniciales totales por vertipuerto reflejan diferencias significativas según su ubicación y requisitos de infraestructura. El vertipuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas y el de Picasso lideran con los mayores costes, cercanos a los 9 millones de euros, mientras que el Hospital Universitario La Paz tiene los costes más bajos. Sin embargo, es importante destacar que estos valores no incluyen aún el coste de adquisición de los eVTOLs, que aumentaría considerablemente el coste total del proyecto.

En cuanto a la distribución de los costes iniciales entre conceptos:

- Construcción de Infraestructura representa la mayor proporción, con un 67%, destacando la inversión necesaria para garantizar que los vertipuertos estén preparados para soportar operaciones eficientes y seguras.
- Contingencias, con un 13%, muestran un enfoque prudente hacia la planificación, permitiendo cubrir imprevistos que puedan surgir durante la ejecución del proyecto.
- Sistemas Tecnológicos y Equipos y Señalización aportan un 9% y un 6%, respectivamente, subrayando la relevancia de integrar tecnología avanzada y equipamiento adecuado en los vertipuertos.
- Diseño y Planificación representa un 5%, asegurando que cada vertipuerto esté diseñado para satisfacer las necesidades operativas específicas.

En general, esta distribución pone de manifiesto que el grueso de la inversión inicial se concentra en la infraestructura, seguida de una planificación robusta y la incorporación de tecnología moderna para garantizar la funcionalidad de los vertipuertos.

5.3.3.2 Costes Operativos Anuales

A continuación, se presentan una tabla y un gráfico resumen de los costes operativos anuales de cada vertipuerto.

Vertipuerto	Costes Operativos Anuales (k€)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	2.020
Picasso	1.650
Estación de Atocha	1.710
Mercamadrid	1.330
Madrid Río	1.260
Hospital Universitario La Paz	710

Tabla 19. Costes Operativos Anuales de cada Vertipuerto en €.

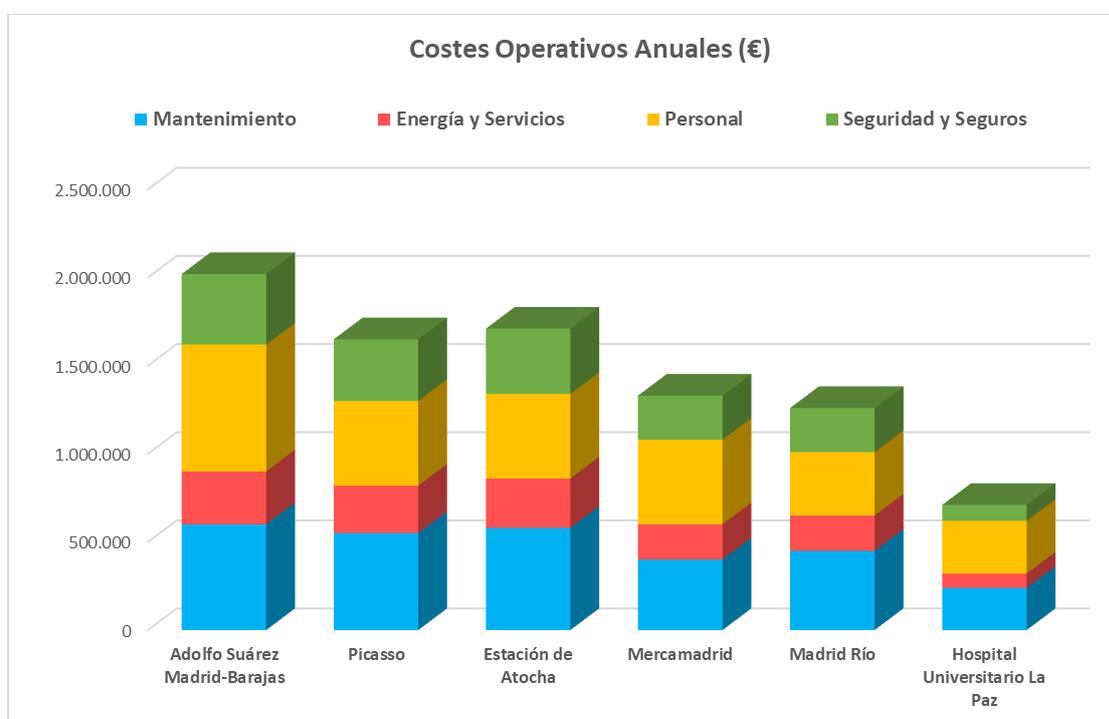


Imagen 45. Costes Operativos Anuales de cada Vertipuerto en €.

Se incluye también una tabla y un gráfico con la contribución de los distintos conceptos a los costes operativos anuales totales de los vertipuertos:

Concepto	Porcentaje sobre los Costes Totales (%)
Mantenimiento	32,49
Energía y Servicios	32,49
Personal	15,32

Seguridad y Seguros	19,70
----------------------------	-------

Tabla 20. Distribución de cada concepto a los Costes Operativos Anuales de los Vertipuertos.



Imagen 46. Distribución de cada concepto a los Costes Operativos Anuales de los Vertipuertos.

Los costes operativos anuales de los vertipuertos varían significativamente según el tamaño y la actividad de cada instalación. Adolfo Suárez Madrid-Barajas tiene los costes más elevados, seguido de Picasso y Estación de Atocha, mientras que el Hospital Universitario La Paz presenta los costes operativos más reducidos debido a su menor nivel de actividad.

La contribución de cada concepto al total de los costes operativos es la siguiente:

- Mantenimiento y Personal comparten la mayor proporción, representando un 32,49% cada uno, lo que subraya la importancia de mantener las instalaciones en óptimas condiciones y contar con personal capacitado para garantizar operaciones seguras y eficientes.
- Energía y Servicios contribuyen con un 19,70%, destacando la relevancia de mantener el funcionamiento continuo de los sistemas de los vertipuertos.
- Seguridad y Seguros, con un 15,32%, refleja el esfuerzo por minimizar riesgos y proteger las instalaciones y las operaciones.

En conjunto, los costes operativos anuales muestran un balance entre los gastos necesarios para mantener altos estándares de calidad y la búsqueda de sostenibilidad financiera en la operación de los vertipuertos.

Por último, se incluye también esta misma información, pero para los costes operativos anuales de cada una de las rutas:

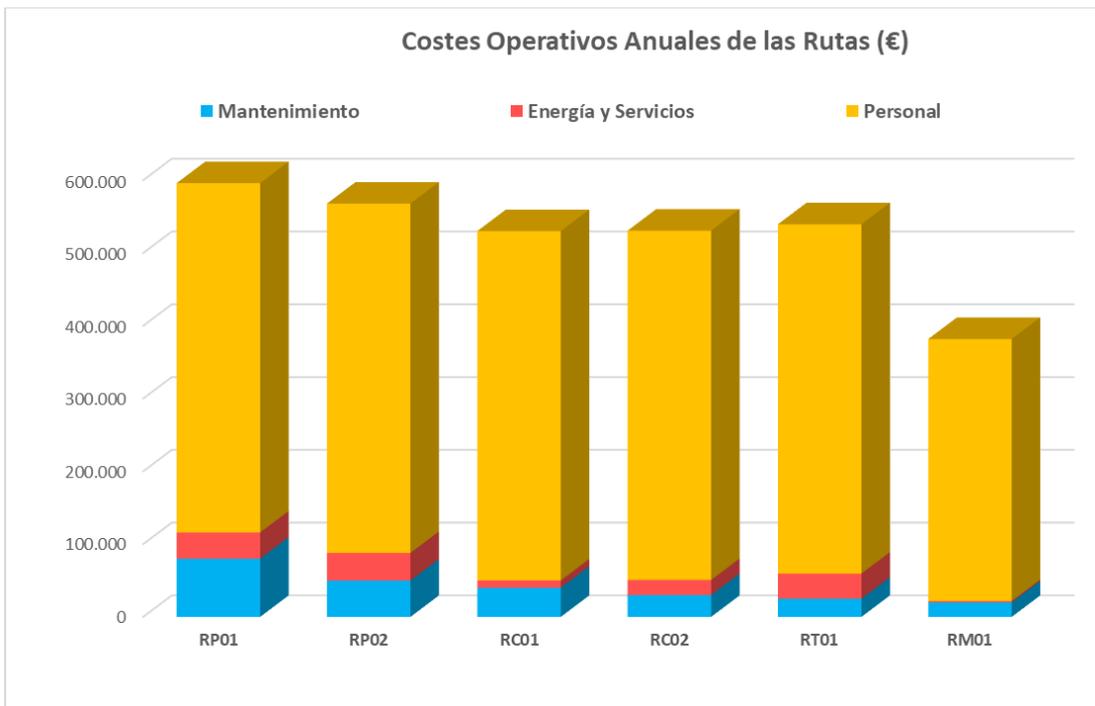


Imagen 47. Costes Operativos Anuales de cada Ruta en €.



Imagen 48. Distribución de cada concepto a los Costes Operativos Anuales de las Rutas.

Los costes operativos anuales de las rutas están dominados por el coste de personal, que representa la mayor parte del total, con un 79,65%, seguido por el mantenimiento (12,25%) y los costes de energía (8,10%). Esta distribución refleja la importancia del factor humano en la operación de las rutas, aunque también pone de manifiesto la oportunidad de optimizar costes mediante la transición hacia operaciones autónomas.

En términos absolutos, las rutas RP01 (Aeropuerto-Torre Picasso) y RP02 (Aeropuerto-Atocha) tienen los costes más altos debido a su alta frecuencia de vuelos y exigencias operativas, mientras que RM01 (La Paz-Barajas-12 de Octubre) presenta los costes más bajos debido a su menor volumen de operaciones.

Por componentes:

- Personal domina ampliamente los costes en todas las rutas, reflejando la dependencia de pilotos y personal de soporte en la operación actual.
- Mantenimiento tiene un peso relevante, garantizando que los eVTOLs y la infraestructura asociada estén en condiciones óptimas de funcionamiento.
- Energía y Servicios es el componente más reducido, pero sigue siendo crítico para mantener las aeronaves y sistemas operativos en funcionamiento.

En conjunto, los costes operativos anuales de las rutas son representativos del modelo actual, pero también evidencian el impacto significativo que tendría la automatización en la mejora de la rentabilidad global del sistema. Esto es especialmente relevante para las rutas más operativamente intensivas, donde la reducción de costes de personal podría liberar recursos para otras inversiones estratégicas.

5.4 Estructura de Ingresos

5.4.1 Inversión Inicial y Estrategias de Participación Público-Privada

El desarrollo de un modelo de negocio basado en la Movilidad Aérea Urbana (UAM) implica enfrentar uno de los mayores retos iniciales: la inversión inicial requerida, que alcanza cifras astronómicas y es difícilmente asumible por empresas privadas de forma independiente. Esta barrera económica ha llevado a que muchas iniciativas en este sector recurran a modelos de Participación Público-Privada (PPP) y a formas de financiación alternativas para superar la falta de liquidez inicial.

La diversidad de enfoques para obtener el capital necesario es un reflejo de la innovación financiera necesaria para impulsar esta tecnología disruptiva. Entre las estrategias más utilizadas destacan:

5.4.1.1 Modelos de Participación Público-Privada (PPP):

Los esquemas PPP son fundamentales para repartir riesgos y maximizar el uso eficiente de recursos. Permiten que el sector público contribuya con infraestructura, regulación y subvenciones, mientras que el sector privado asume los costes de innovación y construcción.

La implementación de infraestructuras innovadoras como los vertipuertos requiere un enfoque pragmático que combine inversión privada con planificación pública para maximizar el uso de los recursos disponibles y garantizar un impacto positivo tanto en la economía como en la sociedad. A continuación, se exploran los modelos más relevantes y se analiza su potencial integración en el marco del proyecto.

- **Concesión Operativa:** En este modelo, el sector privado asume la responsabilidad de diseñar, financiar, construir y operar los vertipuertos durante un período definido,

generalmente establecido en el contrato de concesión. La recuperación de la inversión se realiza a través de tarifas de uso, servicios adicionales y, en algunos casos, subvenciones públicas:

- **Diseño y Construcción:** Empresas especializadas en infraestructura aeroportuaria, como Atlantic Aviation, pueden liderar el diseño y construcción de vertipuertos, aprovechando su experiencia en proyectos similares. Por ejemplo, Atlantic Aviation ha anunciado planes para desarrollar redes de vertipuertos en España, el Reino Unido y Estados Unidos, enfocándose en la movilidad aérea urbana.
- **Operación y Mantenimiento:** La empresa concesionaria gestiona las operaciones diarias, incluyendo el mantenimiento de las instalaciones, la gestión del tráfico aéreo local y la coordinación con operadores de eVTOL (vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical). Un ejemplo de este modelo es la concesión otorgada a ACS para desarrollar y gestionar un vertipuerto en Manhattan, Nueva York, adaptando el actual Downtown Manhattan Heliport para la operación de eVTOLs.
- **Recuperación de la Inversión:** Los ingresos, como se verá más adelante, provienen de tarifas cobradas a los usuarios de las rutas de eVTOL por el uso de las mismas. La concesión puede incluir cláusulas que permitan ajustes en las tarifas para garantizar la viabilidad financiera del proyecto.
- **Ventajas:**
 - **Eficiencia en la Ejecución:** El sector privado, motivado por el retorno de la inversión, suele completar proyectos de manera más eficiente y con mayor control de costos.
 - **Innovación:** La participación privada puede introducir tecnologías y prácticas innovadoras en el diseño y operación de los vertipuertos.
- **Riesgos:**
 - **Dependencia de la Demanda:** La viabilidad financiera depende de una demanda suficiente de servicios de UAM. Una demanda menor a la esperada puede afectar la rentabilidad.
 - **Regulación y Aceptación Pública:** La operación de vertipuertos está sujeta a regulaciones estrictas y requiere la aceptación de la comunidad local, lo que puede influir en las operaciones y los ingresos.

Un ejemplo de Concesión Operativa incluye el Vertipuerto de Manhattan, Nueva York. La empresa española ACS, a través de su filial Skyports, fue seleccionada para desarrollar y gestionar un vertipuerto en Manhattan. El proyecto implica la adaptación del Downtown Manhattan Heliport para operaciones de eVTOLs y carga eléctrica. Aunque el monto exacto de la inversión no se ha divulgado, el contrato inicial es por cinco años, con opción a extenderlo a 20 años. Este proyecto es respaldado por la New York City Economic Development Corporation y el alcalde Eric Adams [\[R47\]](#).

Joint Ventures (JV) entre entes públicos y privados: Este modelo implica la creación de una entidad conjunta entre el sector público y privado, donde ambos aportan recursos y comparten

riesgos y beneficios. En el contexto de UAM, una JV podría involucrar a gobiernos locales, fabricantes de eVTOL y operadores logísticos.

- **Colaboración Público-Privada:** Un ejemplo es la Comisión de Movilidad Aérea Urbana constituida por el Ayuntamiento de Madrid, que busca adaptar la ciudad a nuevas formas de movilidad aérea, colaborando con diversas entidades para desarrollar un marco normativo y operativo adecuado.
- **Desarrollo de Infraestructura:** La JV puede encargarse de la construcción y gestión de vertipuertos, combinando la experiencia técnica del sector privado con el apoyo institucional del sector público.
- **Operación de Servicios:** La entidad conjunta puede operar servicios de UAM, gestionando flotas de eVTOL y coordinando con otros modos de transporte urbano para ofrecer soluciones integradas de movilidad.
 - **Ventajas:**
 - **Sinergias:** Combina recursos y conocimientos del sector público y privado, potenciando la capacidad de ejecución y operación.
 - **Acceso a Financiamiento:** Facilita el acceso a diversas fuentes de financiamiento, incluyendo fondos públicos, inversión privada y subvenciones.
 - **Riesgos:**
 - **Complejidad en la Gestión:** La toma de decisiones puede ser más lenta debido a la necesidad de consenso entre las partes.
 - **Distribución de Beneficios y Riesgos:** Es clave establecer acuerdos claros para evitar conflictos en la distribución de beneficios y la asunción de riesgos.

Un ejemplo de JV Alianza entre Eve y ACCIONA. Eve, una empresa de Embraer dedicada a la UAM, estableció una alianza estratégica con ACCIONA para acelerar el desarrollo de un ecosistema de movilidad aérea urbana sostenible. ACCIONA se convirtió en inversor estratégico de Eve, aportando su experiencia en infraestructuras sostenibles. Aunque el monto exacto de la inversión no se especifica, esta colaboración refuerza el compromiso de ambas empresas con la sostenibilidad en la UAM [\[R48\]](#).

Co-Inversión Público-Privada: Este enfoque combina fondos públicos y privados para financiar proyectos de UAM. Los fondos públicos pueden provenir de programas europeos como SESAR o Horizonte Europa, mientras que la inversión privada puede incluir capital de riesgo y fondos de infraestructura.

- **Financiamiento de Proyectos Piloto:** La co-inversión puede utilizarse para financiar proyectos piloto que demuestren la viabilidad de los servicios de UAM, atrayendo posteriormente a más inversores.
- **Desarrollo de Tecnologías:** Los fondos pueden destinarse al desarrollo de tecnologías necesarias para la operación segura y eficiente de eVTOL y vertipuertos.
 - **Ventajas:**

- **Reducción de Riesgos:** El sector público puede asumir parte del riesgo, haciendo el proyecto más atractivo para inversores privados.
- **Acceso a Subvenciones:** Permite aprovechar subvenciones y programas de financiamiento público destinados a la innovación y sostenibilidad.
- **Riesgos:**
 - **Dependencia de Fondos Públicos:** La disponibilidad de fondos públicos puede estar sujeta a cambios políticos y económicos.
 - **Coordinación Compleja:** Requiere una coordinación efectiva entre múltiples partes interesadas con diferentes objetivos y expectativas.

Un ejemplo de Co-Inversión Público-Privada incluye el proyecto AMU-LED, financiado por la Comisión Europea, que reúne a 17 entidades, incluyendo empresas privadas y organismos públicos, para realizar demostraciones de movilidad aérea urbana en entornos urbanos. Las demostraciones se llevarán a cabo en España, Reino Unido y Países Bajos. Aunque el financiamiento total no se detalla, la participación de múltiples actores y el respaldo de la Comisión Europea indican una inversión significativa en el desarrollo de la UAM [\[R49\]](#).

Proyectos Piloto: Los proyectos piloto permiten probar y ajustar las operaciones de UAM en entornos controlados antes de un despliegue a gran escala. Estos proyectos suelen recibir financiamiento conjunto y apoyo regulatorio para facilitar la innovación.

- **Pruebas de Aerotaxis:** En España, se han realizado pruebas de aerotaxis con empresas como EHang y Volocopter [\[R44\]](#) [\[R45\]](#) [\[R46\]](#). Estos pilotos han demostrado la viabilidad técnica y operativa de los eVTOL, así como la integración con infraestructuras existentes. Estas pruebas también sirven para evaluar el impacto social y medioambiental del sistema.
- **Validación de Infraestructura:** Los proyectos piloto permiten validar el diseño de vertipuertos modulares y escalables, asegurando que cumplen con los requisitos operativos, de seguridad y normativos antes de una implementación masiva.
- **Adaptación Tecnológica:** Durante los pilotos, se prueban tecnologías como los sistemas de gestión del tráfico aéreo (U-Space), estaciones de carga eléctrica y servicios de mantenimiento autónomo.
 - **Ventajas:**
 - **Reducción de Incertidumbre:** Los pilotos ofrecen datos valiosos sobre la viabilidad técnica, económica y social de los proyectos, lo que reduce los riesgos asociados a una inversión a gran escala.
 - **Aumento de Aceptación Pública:** Los pilotos permiten a las comunidades experimentar los beneficios de la UAM, aumentando su aceptación y apoyando futuras implementaciones.
 - **Riesgos:**
 - **Limitación en Escalabilidad:** Los pilotos, aunque exitosos, pueden no replicar completamente las condiciones de una operación comercial a gran escala.
 - **Costos Elevados:** La implementación de pilotos puede requerir inversiones significativas sin garantizar un retorno inmediato.

Hay infinidad de proyectos piloto en España y otros Países. Un ejemplo incluye las Pruebas de Aerotaxis en España. En octubre de 2023, EHang inauguró en el aeropuerto de Lleida-Alguaire el primer centro de operaciones de vehículos aéreos autónomos de Europa, realizando vuelos de demostración con su modelo EH216-S. Este proyecto contó con la colaboración de autoridades locales y refleja una inversión conjunta en la validación de tecnologías de UAM [\[R50\]](#).

5.4.1.2 Créditos y Bonos Verdes

Los créditos y bonos verdes son instrumentos financieros diseñados para fomentar inversiones en proyectos que generen beneficios medioambientales, como la Movilidad Aérea Urbana (UAM). Estos esquemas de financiación están alineados con los objetivos de sostenibilidad global, permitiendo a empresas e instituciones acceder a recursos económicos bajo condiciones favorables, mientras se contribuye a la transición hacia una economía baja en carbono. En el contexto de la UAM, los créditos y bonos verdes son especialmente relevantes para financiar la investigación, desarrollo e implementación de tecnologías sostenibles, así como la construcción de infraestructuras verdes como vertipuertos y estaciones de carga eléctrica para eVTOL.

A continuación, se describen algunos de los ejemplos y posibilidades que hay en España para este tipo de créditos:

- 1. Inversión del CDTI en Proyectos Innovadores:** El Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) financia proyectos de I+D+i que impulsen la innovación tecnológica en sectores estratégicos. Esta financiación optan a recibirla empresas con propuestas tecnológicas innovadoras y viables que promuevan la sostenibilidad pueden aplicar a través de convocatorias específicas del CDTI.
Ejemplo: Crisalion Mobility recibió una inversión de 5,4 millones de euros para desarrollar el eVTOL Integrity y tecnologías complementarias como Intellydrive. Este apoyo público se enfocó en promover la electrificación del transporte urbano, tanto aéreo como terrestre [\[R51\]](#) [\[R52\]](#).
- 2. Programa Horizonte Europa:** España participa activamente en este programa de la Comisión Europea, que financia proyectos de investigación e innovación enfocados en sostenibilidad, transición ecológica y tecnología avanzada. Para acceder al programa es necesario presentar proyectos alineados con los objetivos europeos de sostenibilidad e innovación, liderados por consorcios internacionales [\[R53\]](#).
Ejemplo: El proyecto AMU-LED, centrado en pruebas de UAM en entornos urbanos, con un presupuesto total de 95.500 millones de euros entre 2021 y 2027, recibió fondos europeos de varios millones para demostrar la viabilidad de estas tecnologías [\[R54\]](#).
- 3. Bonos Verdes para Infraestructura de Vertipuertos:** Instrumento de deuda emitido por empresas para financiar proyectos sostenibles, con compromiso de uso exclusivo en actividades verdes. Las emisiones suelen rondar entre 100 y 500 millones de euros según la magnitud del proyecto. El principal requisito consiste en pasar una auditoría externa que certifique el uso de los fondos para proyectos sostenibles y alineados con los estándares internacionales de bonos verdes. [\[R63\]](#) [\[R64\]](#) [\[R65\]](#) [\[R66\]](#) [\[R67\]](#)
- 4. Iniciativas Locales y Regionales:** Programas impulsados por comunidades autónomas para promover la transición ecológica y la movilidad sostenible. Muchas veces son

subvenciones que oscilan entre los 100.000 y 1 millón de euros según el proyecto y los únicos requisitos son presentar proyectos que reduzcan emisiones y fomenten la movilidad sostenible, con impacto medible en el entorno local.

5. **Fondos Europeos Next Generation EU:** Programa de recuperación económica post-COVID-19 enfocado en digitalización y sostenibilidad. España tiene asignados más de 140.000 millones de euros, con fondos distribuidos en convocatorias específicas. Proyectos de movilidad aérea urbana que cumplan con criterios de impacto sostenible y digitalización, avalados por administraciones locales o estatales, pueden alinearse con los objetivos del programa para optar a financiación, como en los casos de electrificación de transporte urbano.

Ventajas y Potencial del Modelo en España

- **Condiciones Financieras Atractivas:** Créditos con tasas de interés bajas o subvenciones directas.
- **Acceso a Capital Internacional:** Los bonos verdes facilitan el acceso a inversores privados interesados en proyectos sostenibles.
- **Foco en Innovación:** Programas como el CDTI y Horizonte Europa priorizan tecnologías disruptivas y con impacto positivo en la sostenibilidad.
- **Impulso Estratégico:** Los fondos locales y europeos alinean a España con las metas globales de sostenibilidad y neutralidad climática.

Este tipo de instrumentos financieros, que no existen de forma tan “accesible” en otros países, podrían posicionar a España como un referente en la implementación de proyectos de UAM, asegurando la viabilidad económica y medioambiental en un sector emergente.

5.4.1.3 Concursos de Startups y Fondos de Innovación:

Los concursos y fondos de innovación representan una oportunidad crucial para el desarrollo de startups en el sector de la Movilidad Aérea Urbana (UAM). A través de programas específicos, estas iniciativas ofrecen financiación, mentoría y recursos para impulsar proyectos innovadores que respondan a los desafíos de la sostenibilidad y la movilidad urbana avanzada.

Programas de Aceleración y Concursos

- **Programa Acelera Startups:** Lanzado por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, este programa tiene como objetivo acelerar el crecimiento de más de 6.100 startups en España. Ofrece ayudas en especie valoradas en 33,3 millones de euros, canalizadas a través de más de 50 aceleradoras en el país. Las startups seleccionadas reciben mentoría, acceso a redes y apoyo técnico [\[R55\]](#).
- **Cellnex Bridge:** Un programa que busca reducir brechas digitales y sociales mediante el apoyo a startups. En cuatro ediciones, ha aportado un total de 190.000 euros a 14 startups, facilitando soluciones como energía sostenible y turismo rural inteligente [\[R56\]](#).

Fondos de Innovación

- **Acelerador del Consejo Europeo de Innovación (CEI):** Este fondo europeo apoya a startups con proyectos disruptivos de alto riesgo, otorgando subvenciones de hasta 2,5 millones de euros. Es una iniciativa clave para startups de UAM que desarrollen tecnologías avanzadas como sistemas de navegación autónoma o vertipuertos modulares [\[R57\]](#).
- **SESAR (Single European Sky ATM Research):** Un programa europeo destinado a modernizar la gestión del tráfico aéreo, que también financia tecnologías relacionadas con la integración de drones y eVTOL. Proyectos como AMU-LED han recibido parte de los 3.000 millones de euros invertidos en SESAR desde su inicio [\[R58\]](#).

5.4.1.4 Inversionistas Estratégicos y Crowdfunding Especializado

El sector de la UAM ha atraído a importantes inversionistas estratégicos y se ha beneficiado del crowdfunding especializado para financiar proyectos ambiciosos. Estos mecanismos son fundamentales para startups y grandes empresas, permitiéndoles acceder a capital privado y conectar con comunidades interesadas en proyectos de alta tecnología.

Inversionistas Estratégicos

- **Ferrovial y su División de Vertipuertos (Comprada recientemente por Atlantic Aviation):** Atlantic Aviation ha anunciado su intención de incorporar un socio financiero para impulsar su negocio de vertipuertos, las infraestructuras destinadas a aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL). Esta estrategia busca atraer inversión significativa para desarrollar una red de vertipuertos a nivel mundial, posicionando a la empresa como líder en el sector de la UAM [\[R59\]](#).
- **ACCIONA y Eve UAM:** ACCIONA ha establecido una alianza estratégica con Eve UAM, una compañía de Embraer, para acelerar el desarrollo de un ecosistema global y sostenible de Movilidad Aérea Urbana. ACCIONA invertirá 30 millones de dólares en esta colaboración, fortaleciendo su posición en el sector de la UAM [\[R60\]](#).

Crowdfunding Especializado

- **Crisalion Mobility:** Anteriormente conocida como UMILES Next, Crisalion Mobility ha lanzado campañas de inversión para financiar el desarrollo de su eVTOL Integrity y soluciones terrestres basadas en la tecnología Intellydrive. La empresa ha recaudado fondos a través de rondas de inversión, incluyendo una Serie A de 15 millones de euros, liderada por los grupos empresariales españoles Grupo Ibérica y Valdemira [\[R61\]](#).
- **Kickstarter:** Plataformas globales como Kickstarter han financiado proyectos relacionados con la UAM o tecnologías complementarias. Por ejemplo, iniciativas de diseño de drones avanzados y conceptos iniciales de vehículos de transporte urbano aéreo han recaudado entre 50.000 y 500.000 euros. Aunque generalmente en fases iniciales, estos proyectos validan ideas innovadoras y atraen comunidades interesadas en su desarrollo [\[R62\]](#).

5.4.1.5 Incentivos Fiscales para el Desarrollo de Tecnologías y Proyectos de UAM

El desarrollo de tecnologías innovadoras y sostenibles en el ámbito de la Movilidad Aérea Urbana (UAM) puede beneficiarse de diversos incentivos fiscales en España, diseñados para

impulsar la inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Estas ventajas fiscales no solo reducen la carga impositiva durante el primer año de inversión, sino que también ofrecen deducciones adicionales en los años posteriores, basadas en el aumento del gasto en I+D respecto al año anterior.

Las deducciones fiscales pueden variar dependiendo de la región en la que se desarrolle el proyecto. Por ejemplo, en Madrid, las empresas pueden aplicar deducciones sobre los gastos en I+D del 25% al 42%, dependiendo de la cantidad invertida y si hay incremento frente a ejercicios previos. Estas deducciones incluyen gastos relacionados con salarios, materiales, uso de laboratorios y, en algunos casos, contratos con entidades externas de investigación. En los años posteriores al primer ejercicio, la deducción se aplica sobre el incremento del gasto en I+D en comparación con la media de los dos ejercicios anteriores.

Además, para actividades clasificadas como innovación tecnológica (mejoras en productos, procesos o servicios, aunque no impliquen investigación pura), se puede aplicar una deducción del 12%. Esto es especialmente relevante para proyectos de UAM, como el diseño de sistemas avanzados de carga eléctrica o la mejora de operaciones logísticas para eVTOL.

Otro incentivo clave son las bonificaciones a la Seguridad Social para personal investigador. Las empresas pueden reducir en un 40% las cuotas de la Seguridad Social por los empleados dedicados exclusivamente a actividades de I+D+i, lo que disminuye considerablemente los costes laborales de los equipos altamente cualificados.

También destaca el esquema Patent Box, que permite una reducción fiscal del 60% en la base imponible de los ingresos derivados de la explotación de patentes, modelos de utilidad y software avanzado. Esto es especialmente útil para las empresas que desarrollan tecnologías propias en el sector UAM, como sistemas de navegación autónoma o soluciones específicas para vertipuertos.

Por ejemplo, una empresa que invierta 1 millón de euros en el desarrollo de un sistema autónomo para la gestión de tráfico en vertipuertos podría beneficiarse de una deducción inicial de hasta 420.000 euros, más bonificaciones laborales y ahorros fiscales en ingresos derivados de patentes. En años sucesivos, la deducción continuaría aplicándose al gasto incremental en I+D, incentivando el crecimiento sostenido de la inversión.

Estos incentivos no solo alivian la carga financiera de los primeros años, cuando las inversiones iniciales suelen ser más elevadas, sino que también fomentan una estrategia a largo plazo para mantener la innovación y competitividad en el sector de la UAM en España. La combinación de deducciones regionales, bonificaciones laborales y ventajas fiscales sobre ingresos tecnológicos crea un entorno favorable para la expansión de estas tecnologías disruptivas.

5.5 Ingresos Operativos

Los ingresos operativos representan el núcleo económico del modelo de negocio, fundamentados en la explotación eficiente de las rutas propuestas y la capacidad de los eVTOLs. Este apartado desglosa de manera detallada las fuentes de ingreso por cada ruta, basándose en proyecciones realistas de demanda, tarifas, y frecuencias operativas. La metodología considera

tanto las características técnicas de las aeronaves (capacidad, tiempo de vuelo, y autonomía) como los factores de mercado, como el perfil de los usuarios, la intermodalidad del transporte y las oportunidades de colaboración con socios estratégicos. Este enfoque permite cuantificar con precisión el potencial de ingresos y establecer una base sólida para evaluar la viabilidad económica del sistema propuesto.

Se considerarán 4 eVTOLs por ruta y se introducirán buffers en prácticamente todos los cálculos para asegurar que los cálculos incluyen un margen de seguridad suficientemente alto. Además, se establecerán hipótesis para considerar que el escenario sea lo suficientemente conservador.

Además de los ingresos propios de la operación de las rutas, detallados en este apartado, también se podrían incluir otros ingresos derivados de la incorporación de publicidad de sponsors en los vertipuertos y eVTOLs, experiencias premium/gourmet en el cielo, transporte urgente de enfermos desde y hasta centros rurales o incluso alquiler de los vertipuertos para su uso por helicópteros privados o públicos (tarifas). Sin embargo, debido a la complejidad de las hipótesis a emplear y con el fin de simplificar el análisis, para este estudio se utilizarán únicamente los ingresos de las rutas propuestas.

5.5.1 Ingresos de la Ruta RP01 (Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas – Torre Picasso)

La ruta RP01 conecta el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas con la Torre Picasso, ubicada en el corazón del distrito financiero de Madrid. Esta ruta está diseñada para ofrecer un transporte rápido y exclusivo a viajeros ejecutivos y turistas con alto poder adquisitivo que buscan minimizar los tiempos de desplazamiento.

La demanda prevista se sustenta en el hecho de que un 15% de los pasajeros de clase ejecutiva que transitan por Barajas podrían estar dispuestos a utilizar este servicio, lo cual, establecería el cuello de botella en la capacidad del servicio en sí. Esta sería la primera hipótesis de escenario conservador.

Características de la Operación

- Trayecto estimado: 11 km a velocidad de crucero de 300 km/h
- Tiempo de vuelo: 2,4 minutos + 0,6 minutos de buffer = 3 minutos.
- Tiempo total por operación: 3 min de vuelo + 2 min extra de buffer + 0,5 min para el intercambio de baterías (10 minutos cada 20 vuelos, diluidos por vuelo).
- Total: 5,5 min por operación.
- Flota asignada: 4 aeronaves Joby S4, con capacidad para 4 pasajeros cada una.

Jornada Operativa

La jornada operativa se extiende durante 16 horas diarias (06:00–22:00), con la última hora dedicada a tareas de mantenimiento y acondicionamiento de las aeronaves.

- Frecuencia de los vuelos:

- Horas pico (07:00–09:00 y 17:00–20:00): Alta demanda debido a los horarios de llegada y salida de vuelos y al tráfico de ejecutivos. La flota completa puede realizar hasta 40 vuelos/hora (10 vuelos por aeronave/hora).
 - Total en 5 horas pico: 200 vuelos.
- Horas no pico (06:00–07:00, 09:00–17:00 y 20:00–21:00): Demanda baja. La frecuencia se reduce a 4 vuelos/hora con la flota completa.
 - Total en 10 horas no pico: 40 vuelos adicionales.
- Total diario: 240 vuelos/día.

Tarifa y Proyección de Ingresos

- Tarifa por billete: 100 €. Este precio es atractivo en comparación con alternativas como taxi o VTC, que pueden costar entre 30 y 40 € y tardar más de 30 minutos en el mismo trayecto.
- Capacidad diaria máxima: 960 pasajeros (240 vuelos × 4 pasajeros).
- Ingresos diarios a plena ocupación: 96.000 € (960 pasajeros × 100 €).
- Operación anual: 200 días operativos.
- Ingresos anuales a plena ocupación: 19,2 M€ (200 días × 96.000 €).

Para un escenario conservador, se asume que solo el 50% de los vuelos generan ingresos (debido a trayectos de regreso vacíos).

- Ingresos anuales ajustados: 9,6 M€.

La ocupación se proyecta crecer gradualmente de forma lineal, comenzando en un 50% el primer año y aumentando 10 puntos porcentuales por año hasta alcanzar el 100% en el quinto año. A partir del sexto año, se mantiene estable.

Año	Ocupación	Ingresos (M€)
1	50%	4,8
2	60%	5,75
3	70%	6,7
4	80%	7,7
5	90%	8,65
6	100%	9,6
7	100%	9,6

Tabla 21. Ingresos proyectados de la ruta RP01 por años.

Este escalado refleja el periodo de adaptación del mercado al nuevo servicio y su progresivo arraigo en la rutina de viajeros con altas exigencias de eficiencia en su movilidad urbana. De este modo, la ruta RP01 muestra un potencial elevado de generar ingresos sostenidos a medida que se alcanza la ocupación máxima y la demanda madura, incluso teniendo en cuenta la serie de perspectivas conservadoras aplicadas.

5.5.2 Ingresos de la Ruta RP02 (Estación de Atocha – Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas)

La ruta RP02 conecta la Estación de Atocha, principal hub ferroviario de Madrid, con el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Esta ruta está diseñada para ofrecer una conexión rápida y eficiente para viajeros que combinan vuelos internacionales con trenes de alta velocidad (AVE), fomentando la intermodalidad y reduciendo la congestión del transporte terrestre.

La demanda prevista se basa en el hecho de que un 10% de los pasajeros que transitan por la estación y el aeropuerto podrían estar interesados en este servicio, especialmente aquellos que combinan vuelos internacionales con trenes de alta velocidad (AVE).

Características de la Operación

- Trayecto estimado: 12,4 km a velocidad de crucero de 300 km/h
- Tiempo de vuelo: 2,4 minutos + 0,6 minutos de buffer = 3 minutos.
- Tiempo total por operación: 3 min de vuelo + 2 min extra de buffer + 0,5 min para el intercambio de baterías (10 minutos cada 19 vuelos, diluidos por vuelo).
- Total: 5,5 min por operación.
- Flota asignada: 4 aeronaves Joby S4, con capacidad para 4 pasajeros cada una.

Jornada Operativa

La jornada operativa se extiende durante 16 horas diarias (06:00–22:00), con la última hora dedicada a tareas de mantenimiento y acondicionamiento de las aeronaves.

- Frecuencia de los vuelos:
 - Horas pico (07:00–09:00 y 17:00–20:00): Alta demanda debido a los horarios de llegada y salida de vuelos y al tráfico de ejecutivos. La flota completa puede realizar hasta 40 vuelos/hora (10 vuelos por aeronave/hora).
 - Total en 5 horas pico: 200 vuelos.
 - Horas no pico (06:00–07:00, 09:00–17:00 y 20:00–21:00): Demanda baja. La frecuencia se reduce a 4 vuelos/hora con la flota completa.
 - Total en 10 horas no pico: 40 vuelos adicionales.
 - Total diario: 240 vuelos/día.

Tarifa y Proyección de Ingresos

- Tarifa por billete: 100 €. Este precio es atractivo en comparación con alternativas como taxi o VTC, que pueden costar entre 30 y 40 € y tardar más de 30 minutos en el mismo trayecto.
- Capacidad diaria máxima: 960 pasajeros (240 vuelos × 4 pasajeros).
- Ingresos diarios a plena ocupación: 96.000 € (960 pasajeros × 100 €).
- Operación anual: 200 días operativos.

- Ingresos anuales a plena ocupación: 19,2 M€ (200 días × 96.000 €).

Para un escenario conservador, se asume que solo el 50% de los vuelos generan ingresos (debido a trayectos de regreso vacíos).

- Ingresos anuales ajustados: 9,6 M€.

La ocupación se proyecta crecer gradualmente de forma lineal, comenzando en un 50% el primer año y aumentando 10 puntos porcentuales por año hasta alcanzar el 100% en el quinto año. A partir del sexto año, se mantiene estable.

Año	Ocupación	Ingresos (M€)
1	50%	4,8
2	60%	5,75
3	70%	6,7
4	80%	7,7
5	90%	8,65
6	100%	9,6
7	100%	9,6

Tabla 22. Ingresos proyectados de la ruta RP02 por años.

La Ruta RP02 proporciona una conexión eficiente y rápida entre dos nodos de transporte clave en Madrid, facilitando la intermodalidad para viajeros que combinan vuelos y trenes de alta velocidad. El crecimiento progresivo de la demanda y la optimización del tiempo de viaje proyectan una sólida rentabilidad. Esta ruta contribuirá significativamente a mejorar la movilidad urbana y a ofrecer una alternativa premium a los desplazamientos terrestres convencionales.

5.5.3 Ingresos de la Ruta RT01 (Madrid Río – Ruta Turística Panorámica)

La ruta RT01 ofrece una experiencia turística única, permitiendo a los pasajeros disfrutar de vistas panorámicas aéreas de los principales puntos de interés de Madrid y sus alrededores. Esta ruta está diseñada para turistas y residentes que buscan una experiencia exclusiva y diferente para explorar la ciudad desde el aire.

El trayecto inicia y finaliza en el vertipuerto de Madrid Río, realizando un recorrido de 40 km que incluye vistas a la Casa de Campo, el Templo de Debod, el Palacio Real, el Retiro, el estadio Santiago Bernabéu, las cuatro torres, y otros puntos emblemáticos. Se estima una demanda inicial de turistas locales e internacionales, especialmente durante fines de semana y temporadas altas.

Características de la Operación

- Trayecto estimado: 30 minutos de vuelo a una velocidad de crucero de 100 km/h.



- Tiempo total por operación: 30 min de vuelo + 10 min de buffer (Se considera mayor buffer por el tipo de operación) + 1,5 min para el intercambio de baterías (10 min cada 6 vuelos, diluidos por vuelo).
Total: 41,5 min por operación.
- Flota asignada: 4 aeronaves Joby S4 con capacidad para 4 pasajeros cada una.
- Capacidad máxima operativa: 2,8 vuelos/hora.

Jornada Operativa

La jornada operativa abarca 18 horas diarias (06:00–23:00), con operación únicamente en los fines de semana y períodos vacacionales. Esto incluye en torno a 170 días al año en Madrid. La última hora está dedicada a tareas de mantenimiento y acondicionamiento de las aeronaves. La frecuencia de los vuelos es la siguiente:

- Frecuencia de los vuelos:
 - Durante toda la jornada operativa: 2,8 vuelos/hora con la flota completa.
 - Total en 17 horas: 47,6 vuelos.

Tarifa y Proyección de Ingresos

- Se proponen dos tipos de tarifas, debido a la naturaleza exclusiva y experiencial del servicio.
 - 200€/billete durante 15 de las 17 horas.
 - 300€/billete durante 2 de las 17 horas, coincidiendo cada una de estas horas con el amanecer y el anochecer, respectivamente.
- Esta tarifa es competitiva en comparación con otros tours premium por la ciudad.
- Capacidad diaria máxima: 190 pasajeros (47,6 vuelos × 4 pasajeros).
- Ingresos diarios a plena ocupación: 40.240 € (22,4 pasajeros × 300 € + 167,6 pasajeros × 200€).
- Se considera una operación de 170 días anuales (fines de semana y festivos).
- Ingresos anuales a plena ocupación: 6,84 M€.

La ocupación se proyecta crecer gradualmente de forma lineal, comenzando en un 50% el primer año y aumentando 10 puntos porcentuales por año hasta el quinto año, cuando se alcanza el 100%. A partir del sexto año, se mantiene estable.

Año	Ocupación (%)	Ingresos (M€)
1	50%	3,42
2	60%	4,1
3	70%	4,79
4	80%	5,47
5	90%	6,16

6	100%	6,84
7	100%	6,84

Tabla 23. Ingresos proyectados de la ruta RT01 por años.

La Ruta RT01 presenta una propuesta de alto valor añadido para el turismo en Madrid, combinando rapidez, exclusividad y una experiencia única. La progresión de ingresos refleja un potencial sólido para captar un segmento de clientes dispuestos a pagar por un servicio premium, contribuyendo significativamente a la rentabilidad del sistema de movilidad aérea urbana.

5.5.4 Ingresos de la Ruta RC01 (Mercamadrid – Torre Picasso)

La ruta RC01 conecta Mercamadrid, el principal mercado de productos frescos y centro logístico de la ciudad, con Torre Picasso, en el corazón del distrito financiero de Madrid. El objetivo es ofrecer un transporte rápido y eficiente para la distribución de productos frescos y paquetería urgente hacia una zona con alta demanda comercial y empresarial. Este servicio está diseñado para empresas de logística y distribución que buscan optimizar los tiempos de entrega y reducir la congestión de tráfico terrestre.

Características de la Operación

- Trayecto estimado: 10 km
- Tiempo de vuelo: 3 minutos
- Tiempo total por operación: 3 min de vuelo + 15 min de carga/descarga + 1 min de buffer + 1 min para el intercambio de baterías (cada 10 vuelos, 10 min diluidos por vuelo).
- Total: 20 min por operación
- Flota asignada: 4 aeronaves Joby S4, con una capacidad de carga máxima de carga de 350 kg por vuelo. Para la estimación de esta carga máxima se han asignado más de 100kg para el piloto.

Jornada Operativa

La operación se planifica para 16 horas diarias (06:00–22:00), con la última hora destinada a mantenimiento y acondicionamiento de las aeronaves.

Se han identificado dos franjas horarias clave:

- Horas pico (06:00–09:00 y 16:00–20:00): Alta demanda de distribución de productos frescos y paquetería urgente. Durante estas 7 horas pico, la flota completa puede realizar hasta 12 vuelos/hora (3 vuelos por aeronave/hora), logrando 84 vuelos diarios.
- Horas no pico (09:00–16:00 y 20:00–21:00): Demanda moderada para entregas programadas. Durante estas 8 horas no pico, la frecuencia se reduce a 1 vuelo/hora logrando 8 vuelos adicionales.
- Total diario: 92 vuelos/día.

Tarifa y Proyección de Ingresos

Se propone una tarifa mínima de 200€/vuelo para cargas de hasta 100 kg, aumentando linealmente hasta 800€/vuelo para cargas de 350 kg, y 1000€/vuelo para cargas de 450 kg al incluir la posibilidad de hacer vuelos autónomos sin piloto. Se consideran estas tarifas debido a la rapidez y exclusividad del servicio en comparación con el transporte terrestre convencional, que puede ser más lento y estar sujeto a congestión.

- Capacidad diaria máxima: 92 vuelos/día
- Ingresos diarios a plena ocupación con piloto: 46.000 € (92 vuelos × 500 €)
- Ingresos diarios a plena ocupación sin piloto: 55.200 € (92 vuelos × 600€)
- Operación anual: 300 días
- Ingresos anuales a plena ocupación con piloto: 13,8 M€
- Ingresos anuales a plena ocupación sin piloto: 16,56 M€

Para un escenario conservador, se asume que solo la mitad de los vuelos generan ingresos (asumiendo aeronaves vacías en los trayectos de regreso). Esto ajusta los ingresos a:

- Ingresos anuales ajustados con piloto: 6,9 M€
- Ingresos anuales ajustados sin piloto: 8,28 M€

La ocupación se proyecta crecer gradualmente de forma lineal, comenzando en un 50% el primer año y aumentando 10 puntos porcentuales cada año hasta alcanzar el 100% en el quinto año. A partir del sexto año, se mantiene estable.

Año	Ocupación (%)	Ingresos con piloto (M€)	Ingresos sin piloto (M€)
1	50%	3,45	4,14
2	60%	4,14	5
3	70%	4,83	5,8
4	80%	5,52	6,62
5	90%	6,21	7,45
6	100%	6,9	8,28
7	100%	6,9	8,28

Tabla 24. Ingresos proyectados de la ruta RC01 por años.

La Ruta RC01 ofrece una solución eficiente y rápida para la distribución de productos frescos y paquetería urgente desde Mercamadrid hacia el centro financiero de la ciudad. La combinación de alta frecuencia, rapidez en los tiempos de entrega y un crecimiento progresivo de la ocupación proyecta una sólida rentabilidad. Este servicio ayudará a reducir la congestión del tráfico terrestre y mejorar la eficiencia logística en Madrid.

5.5.5 Ingresos de la Ruta RC02 (Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas – Torre Picasso)

La ruta RC02 conecta el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas con la Torre Picasso, ubicada en pleno centro financiero de Madrid. El objetivo de esta ruta es facilitar el transporte rápido y eficiente de bienes importados/exportados y paquetería urgente hacia una zona empresarial con alta demanda logística. Este servicio está orientado a empresas que requieren entregas inmediatas y de alta prioridad.

Características de la Operación

- Trayecto estimado: 11 km
- Tiempo de vuelo: 3 minutos
- Tiempo total por operación: 3 min de vuelo + 5 min de carga/descarga (Cargas más livianas) + 1 min de buffer + 1 min para el intercambio de baterías (cada 10 vuelos, 10 min diluidos por vuelo).
- Total: 10 min por operación
- Flota asignada: 4 aeronaves Joby S4, con una capacidad de carga máxima de carga de 350 kg por vuelo. Para la estimación de esta carga máxima se han asignado más de 100kg para el piloto.

Jornada Operativa

La operación se planifica para 16 horas diarias (06:00–22:00), con la última hora destinada a mantenimiento y acondicionamiento de las aeronaves.

Se han identificado dos franjas horarias clave:

- Horas pico (06:00–09:00 y 16:00–20:00): Alta demanda de distribución de productos premium y paquetería urgente. Durante estas 7 horas pico, la flota completa puede realizar hasta 24 vuelos/hora (6 vuelos por aeronave/hora), logrando 168 vuelos diarios.
- Horas no pico (09:00–16:00 y 20:00–21:00): Demanda moderada para entregas programadas. Durante estas 8 horas no pico, la frecuencia se reduce a 2 vuelos/hora logrando 16 vuelos adicionales.
- Total diario: 184 vuelos/día.

Tarifa y Proyección de Ingresos

En este caso, se propone una tarifa en función de la antelación con la que se haya requerido el servicio, si ha sido programado, y la carga que se requiera transportar. Para efectos de cálculo se utilizará una tarifa media de 350€/vuelo. Para vuelos autónomos (sin piloto), la tarifa incrementa un 20% debido a la mayor capacidad de carga disponible.

- Capacidad diaria máxima: 184 vuelos/día.
- Ingresos diarios a plena ocupación con piloto: 64.400 € (184 vuelos × 350 €).
- Ingresos diarios a plena ocupación sin piloto: 77.280 € (184 vuelos × 420 €).
- Operación anual: 250 días.

- Ingresos anuales a plena ocupación con piloto: 16,1 M€.
- Ingresos anuales a plena ocupación sin piloto: 19,32 M€.

Para un escenario conservador, se asume que solo la mitad de los vuelos generan ingresos (asumiendo aeronaves vacías en los trayectos de regreso). Esto ajusta los ingresos a:

- Ingresos anuales ajustados con piloto: 8,05 M€
- Ingresos anuales ajustados sin piloto: 9,66 M€.

La ocupación se proyecta crecer gradualmente de forma lineal, comenzando en un 50% el primer año y aumentando 10 puntos porcentuales cada año hasta alcanzar el 100% en el quinto año. A partir del sexto año, se mantiene estable.

Año	Ocupación (%)	Ingresos con piloto (M€)	Ingresos sin piloto (M€)
1	50%	4,03	4,83
2	60%	4,83	5,8
3	70%	5,64	6,77
4	80%	6,44	7,73
5	90%	7,25	8,7
6	100%	8,05	9,66
7	100%	8,05	9,66

Tabla 25. Ingresos proyectados de la ruta RC02 por años.

La Ruta RC02 ofrece una solución eficiente para el transporte de carga urgente desde el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas hasta el distrito financiero de Madrid. La combinación de alta frecuencia, rapidez y una demanda progresiva proyecta una sólida rentabilidad. Este servicio contribuirá a optimizar los tiempos de entrega, reducir la congestión del tráfico terrestre y mejorar la eficiencia logística en la ciudad.

5.5.6 Ingresos de la Ruta RM01 (Hospital La Paz – Hospital 12 de Octubre – Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas)

La ruta RM01 conecta el Hospital La Paz, el Hospital 12 de Octubre y el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Esta ruta está diseñada para transportar órganos, medicamentos y pacientes en situaciones críticas, priorizando la inmediatez y disponibilidad continua.

Características de la Operación

- Trayectos Estimados:
 - Hospital La Paz ↔ Hospital 12 de Octubre: 11 km (3 minutos)
 - Hospital La Paz ↔ Aeropuerto Barajas: 11 km (3 minutos)
 - Hospital 12 de Octubre ↔ Aeropuerto Barajas: 15,2 km (4 minutos)
- Tiempo Total por Operación:

- 3-4 min de vuelo + 2 min de buffer + 0,5 min para el intercambio de baterías (cada 15-20 vuelos, dependiendo del trayecto).
- Total: 5,5-6,5 min por operación.
- Flota Asignada:
 - 2 aeronaves Joby S4 con capacidad para transportar hasta 200 kg por vuelo (asignando otros 250 kg al piloto y equipos médicos), debido a la baja necesidad de vuelos continuos.
 - Distribución:
 - 1 eVTOL en Barajas
 - 1 eVTOL en Hospital La Paz

Jornada Operativa

La operación se planifica durante 24 horas al día, los 365 días del año, asegurando disponibilidad ininterrumpida.

- Frecuencia Estimada: Operación bajo demanda con una media de 5 vuelos diarios debido a la naturaleza crítica y costosa del servicio.
- Trayectos cubiertos:
 - La Paz ↔ 12 de Octubre
 - La Paz ↔ Aeropuerto Barajas
 - 12 de Octubre ↔ Aeropuerto Barajas

Tarifa y Proyección de Ingresos

- Tarifa por vuelo: 3.000 € por la urgencia, disponibilidad inmediata y el valor crítico del servicio.
- Ingresos diarios a plena ocupación: 15.000 € (5 vuelos × 3.000 €).
- Operación anual: 365 días operativos.

Ingresos anuales a plena ocupación: 15.000 € × 365 días = 5,48 M€

- En este caso sí que se asume que el 100% de los vuelos generan ingresos, ya que la ocupación se considera inferior a la mitad

En este caso, se considera que la ocupación es continua, puesto que la demanda de este tipo de servicio no debería crecer a lo largo de los primeros años o aumentar su ocupación.

Año	Ocupación (%)	Ingresos (M€)
1	100%	5,48
2	100%	5,48
3	100%	5,48
4	100%	5,48
5	100%	5,48

6	100%	5,48
7	100%	5,48

Tabla 26. Ingresos proyectados de la ruta RM01 por años.

La Ruta RM01 ofrece un servicio aéreo esencial para el transporte urgente de recursos médicos y pacientes críticos en Madrid. La alta tarifa por vuelo se justifica por la inmediatez, disponibilidad y el valor crítico de los recursos transportados. El crecimiento gradual de la ocupación asegura un aumento sostenido de la rentabilidad, consolidando su valor estratégico dentro de la infraestructura sanitaria de la ciudad.

5.5.7 Resumen de Ingresos Anuales por Rutas

A continuación, se presenta un gráfico resumen de los ingresos anuales proyectados durante 10 años para cada una de las rutas:

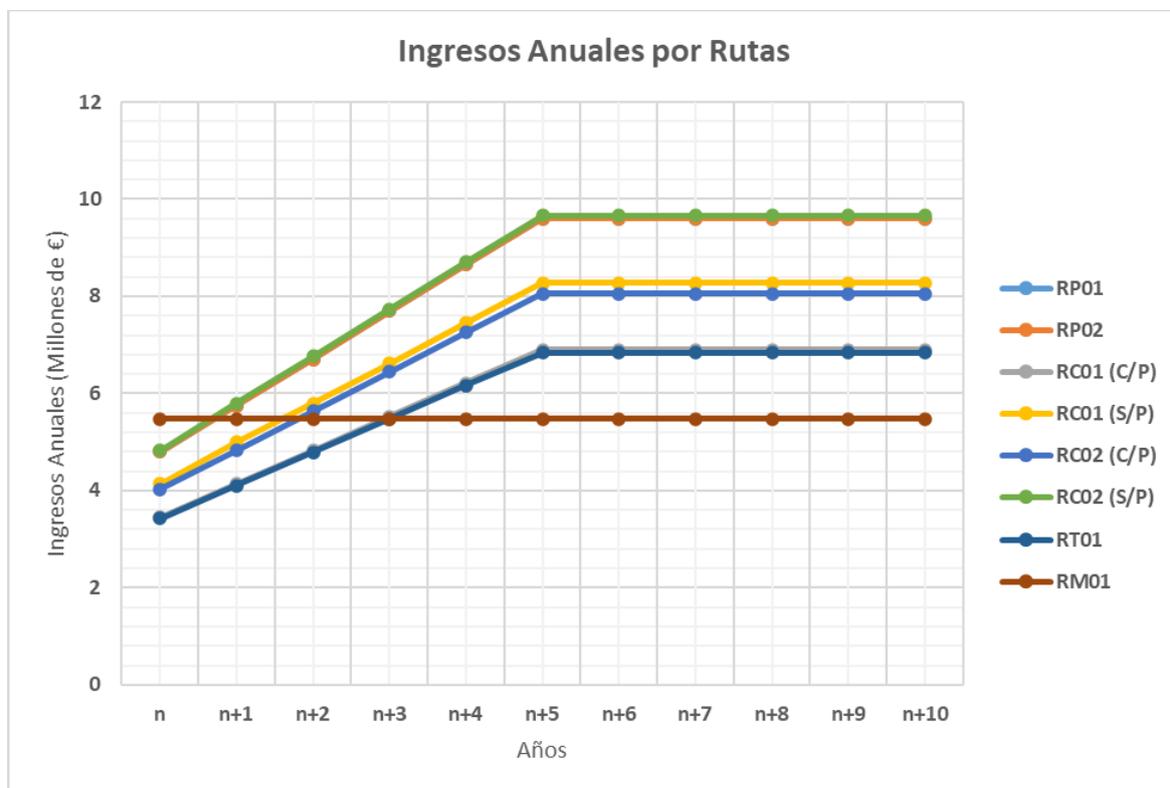


Imagen 49. Ingresos Anuales por Rutas en Millones de €.

Se observa cómo los ingresos de todas las rutas, salvo los de la RM01, crecen linealmente desde el 50% hasta el 100% de los ingresos estimados debido a la proyección de demanda descrita.

Esto supone, para la mayoría de rutas, un crecimiento ligeramente acelerado de los ingresos acumulados durante los primeros 5 años, y lineal a partir de entonces:

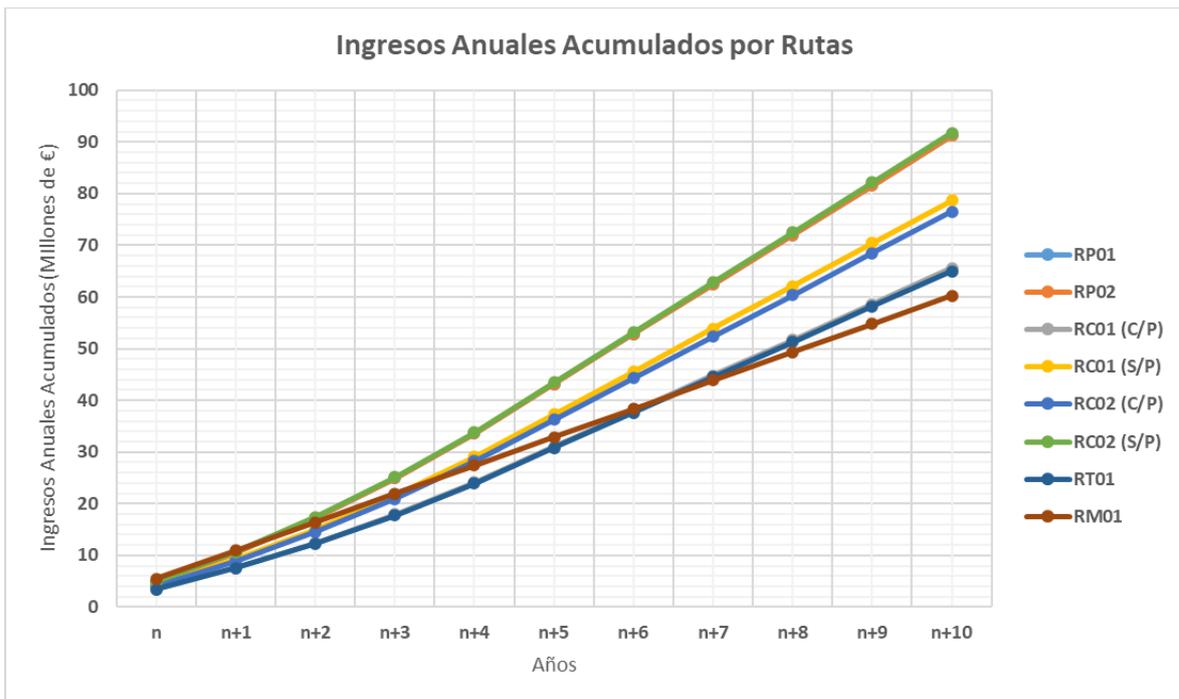


Imagen 50. Ingresos Anuales por Rutas en Millones de €.

6 Análisis de Viabilidad Económica y Financiera

6.1 Resumen de Ingresos, Costes y Escenarios Operativos

Se analizará el escenario en el que se opera cada ruta, teniendo en cuenta todos los costes asociados tanto a la operación de cada ruta como a la inversión inicial necesaria para comprar los eVTOLs.

A su vez, para segregar la rentabilidad y proyecciones financieras entre rutas se repartirán los costes operativos anuales derivados de los propios vertipuertos proporcionalmente al número de vuelos operados por cada ruta en cada uno, contrastados con el número total de vuelos en dicho vertipuerto:

Vertipuerto	Ruta	Vuelos por Ruta	Vuelos Totales del Vertipuerto	Contribución (%)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	RP01	48.000	143.825	33,4
	RP02	48.000		33,4
	RC02	46.000		32,0
	RM01	1.825		1,2
Torre Picasso	RP01	48.000	121.600	39,5
	RC01	27.600		22,7
	RC02	46.000		37,8
Estación de Atocha	RP02	48.000	48.000	100
Mercamadrid	RC01	27.600	27.600	100
Madrid Río	RT01	8.092	8.092	100
Hospital La Paz	RM01	1.825	1.825	100

Tabla 27. Contribución de cada ruta al total de vuelos realizados en cada Vertipuerto.

La mayoría de vertipuertos son utilizados por una sola ruta. Sin embargo, hay dos vertipuertos que sirven como hub de varias rutas con distintos porcentajes de utilización de las mismas; el vertipuerto de Barajas y el de la Torre Picasso:

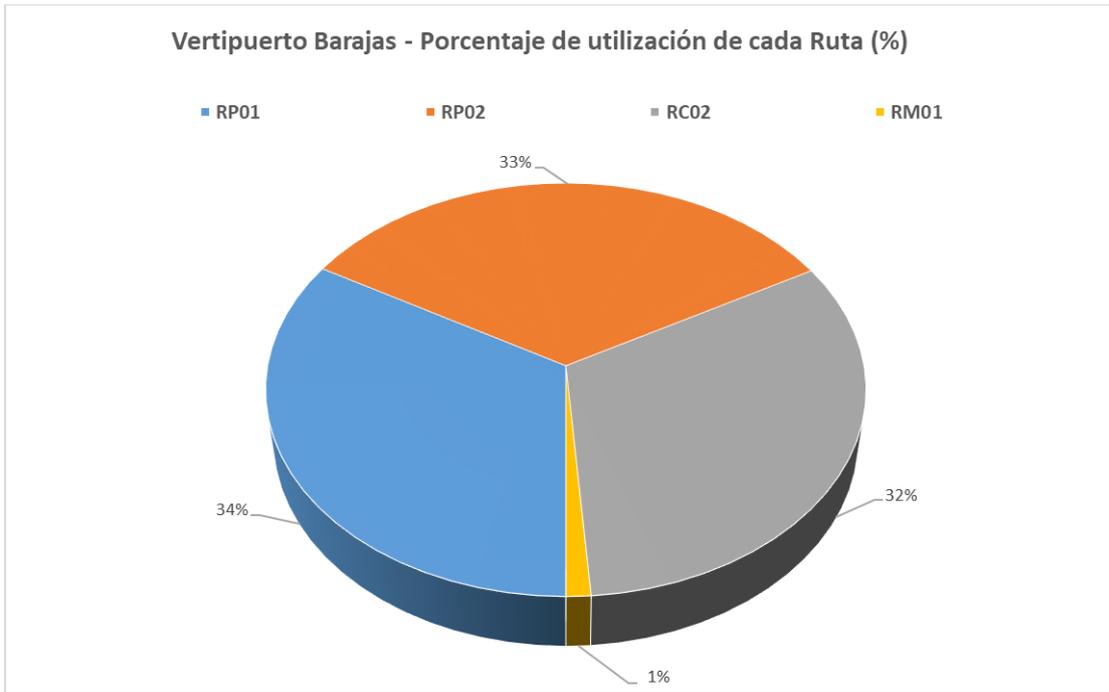


Imagen 51. Porcentaje de Utilización de cada Ruta en el Vertipuerto de Barajas.

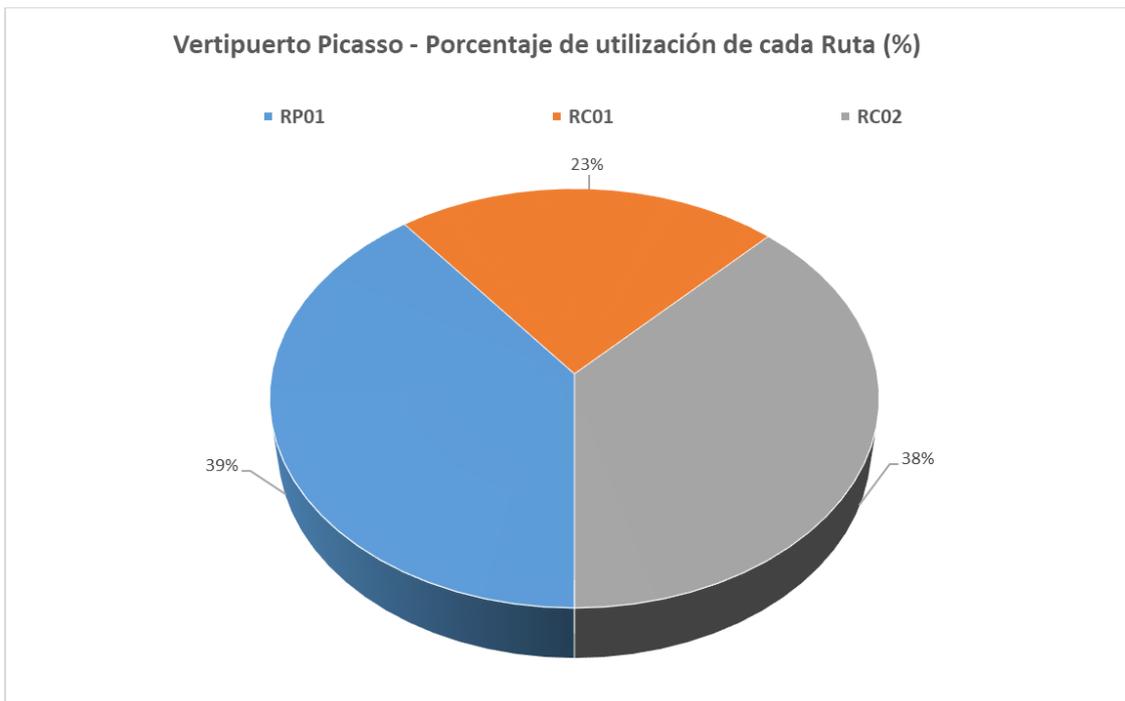


Imagen 52. Porcentaje de Utilización de cada Ruta en el Vertipuerto de la Torre Picasso.

De esta forma, se puede asignar un porcentaje razonable del coste de cada vertipuerto a las rutas que lo operan con fines analíticos.

Además, también se evaluará un escenario con coste de personal asociado a los pilotos y otro sin este coste utilizando aeronaves autónomas. Este análisis permite identificar el impacto económico del avance tecnológico hacia aeronaves autónomas, anticipando posibles reducciones en los costes operativos a largo plazo.

Con estas hipótesis se pueden obtener los siguientes resultados de los costes iniciales de cada ruta (incluyendo eVTOLs y la asignación correspondiente a cada ruta de la inversión de los vertipuertos). Esto se corresponde con la inversión inicial total necesaria para comenzar a operar cada una de las rutas:

Ruta	Costes Iniciales Totales
RP01	10.427.235 €
RP02	15.943.210 €
RC01	12.000.665 €
RC02	10.154.110 €
RT01	10.785.000 €
RM01	8.666.780 €

Tabla 28. Resumen de Costes Iniciales Totales de cada Ruta.

Y los costes operativos anuales de cada una de las rutas, con y sin pilotos:

Ruta	Costes Operativos Totales con Pilotos	Costes Operativos Totales sin Pilotos
RP01	1.922.430 €	1.442.430 €
RP02	2.952.570 €	2.472.570 €
RC01	2.234.660 €	1.754.660 €
RC02	1.800.800 €	1.320.800 €
RT01	1.799.500 €	1.559.500 €
RM01	1.116.055 €	756.055 €

Tabla 29. Resumen de Costes Operativos Anuales Totales de cada Ruta, con y sin Pilotos.

Se puede observar un valor mucho más alto en los costes iniciales totales, ya que el primer año incluye la inversión inicial necesaria para la construcción de los vertipuertos, además de la compra de los eVTOLs y, por supuesto, los costes operativos del primer año que, en la mayoría de casos no alcanzan a ser ni el 15% de ese coste total inicial. Se diferencian los costes con (C/P) y sin pilotos (S/P):

Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01 (C/P)	12.349.665	1.922.430	1.922.430	1.922.430	1.922.430	1.922.430	1.922.430	1.922.430	1.922.430	1.922.430	1.922.430
RP01 (S/P)	11.869.665	1.442.430	1.442.430	1.442.430	1.442.430	1.442.430	1.442.430	1.442.430	1.442.430	1.442.430	1.442.430
RP02 (C/P)	18.895.780	2.952.570	2.952.570	2.952.570	2.952.570	2.952.570	2.952.570	2.952.570	2.952.570	2.952.570	2.952.570
RP02 (S/P)	18.415.780	2.472.570	2.472.570	2.472.570	2.472.570	2.472.570	2.472.570	2.472.570	2.472.570	2.472.570	2.472.570
RC01 (C/P)	14.235.325	2.234.660	2.234.660	2.234.660	2.234.660	2.234.660	2.234.660	2.234.660	2.234.660	2.234.660	2.234.660
RC01 (S/P)	13.755.325	1.754.660	1.754.660	1.754.660	1.754.660	1.754.660	1.754.660	1.754.660	1.754.660	1.754.660	1.754.660
RC02 (C/P)	11.954.910	1.800.800	1.800.800	1.800.800	1.800.800	1.800.800	1.800.800	1.800.800	1.800.800	1.800.800	1.800.800
RC02 (S/P)	11.474.910	1.320.800	1.320.800	1.320.800	1.320.800	1.320.800	1.320.800	1.320.800	1.320.800	1.320.800	1.320.800
RT01 (C/P)	12.584.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500	1.799.500
RT01 (S/P)	12.344.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500	1.559.500
RM01 (C/P)	9.782.835	1.116.055	1.116.055	1.116.055	1.116.055	1.116.055	1.116.055	1.116.055	1.116.055	1.116.055	1.116.055
RM01 (S/P)	9.422.835	756.055	756.055	756.055	756.055	756.055	756.055	756.055	756.055	756.055	756.055

Tabla 30. Costes Totales de cada Ruta por años en €, con y sin pilotos.

A su vez, se recuperan de los apartados anteriores los Ingresos anuales de cada una de las rutas en millones de euros. En este caso solo hay diferencias en cuanto a ingresos con y sin pilotos

para las rutas de carga RC01 y RC02, debido a que eliminar el piloto permite aumentar la cantidad de carga y, por tanto, los ingresos:

Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01	4,8	5,75	6,7	7,7	8,65	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
RP02	4,8	5,75	6,7	7,7	8,65	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
RC01 (C/P)	3,45	4,14	4,83	5,52	6,21	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
RC01 (S/P)	4,14	5	5,8	6,62	7,45	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28
RC02 (C/P)	4,03	4,83	5,64	6,44	7,25	8,05	8,05	8,05	8,05	8,05	8,05
RC02 (S/P)	4,83	5,8	6,77	7,73	8,7	9,66	9,66	9,66	9,66	9,66	9,66
RT01	3,42	4,1	4,79	5,47	6,16	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84
RM01	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48

Tabla 31. Ingresos Totales de cada Ruta por años en millones de €.

Se analizarán las proyecciones del modelo de negocio y la rentabilidad a 10 años vista. Se considera éste un tiempo lo suficientemente largo como para ver los frutos del potencial desembolso inicial en relación a los cálculos de rentabilidad, pero no tanto como para difuminar los resultados debido a un posible cambio en el contexto tecnológico/social.

Por último, a pesar de haber utilizado un alto número de hipótesis subjetivamente conservadoras, el lector podría pensar que no lo son suficiente, o incluso que son excesivamente conservadoras. Es por ello que, para tratar de amortiguar esta subjetividad, se tendrán en cuenta tres escenarios distintos:

- **Escenario Baseline:** Los ingresos y todo lo demás se mantiene como lo desarrollado hasta aquí.
- **Escenario Optimista:** Se establece un escenario con un aumento en la demanda a través de un aumento del 30% en los ingresos operativos anuales para todas las rutas.
- **Escenario Pesimista:** Se establece un escenario con una disminución de la demanda a través de una disminución del 30% en los ingresos operativos anuales para todas las rutas.

6.2 Proyecciones Financieras Detalladas de las Rutas

Con los datos recopilados en el apartado [Resumen de Ingresos, Costes y Escenarios Operativos](#), se pueden realizar cálculos detallados de las proyecciones financieras del modelo de negocio. Este análisis permitirá evaluar la viabilidad económica de cada una de las rutas y, posteriormente, de la red completa de vertipuertos y rutas como modelo integral, para cada uno de los escenarios propuestos. A continuación, se describen las métricas clave que se calcularán y su importancia para la evaluación del proyecto.

- **Flujo de Caja Bruto Acumulado:** El flujo de caja bruto acumulado se define como la diferencia entre los ingresos operativos anuales y los costes operativos anuales de cada ruta, incluyendo también los costes iniciales. Este indicador es fundamental para medir el momento en el que se comienzan a percibir rentabilidades positivas en cada una de las rutas.

$$FCb\ acum\ (\text{Año } n) = FCb\ acum\ (\text{Año } n - 1) + \text{Ingresos} (\text{Año } n) - \text{Costes} (\text{Año } n)$$

- **Valor Actual Neto (VAN):** El Valor Actual Neto (VAN) evalúa la rentabilidad del proyecto considerando los flujos de caja futuros descontados a una tasa específica. Esta tasa refleja el coste de oportunidad del capital y el riesgo asociado al modelo de negocio. Para este análisis, se utilizará una tasa de descuento del 10% anual, que se encuentra dentro del rango habitual del 8%-12% para proyectos con un perfil de riesgo similar.

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{FCb(\text{Año } n)}{(1+r)^n}$$

Donde:

- **N:** Horizonte temporal (10 años).
- **R:** Tasa de descuento (10%).
- **Inversión Inicial:** Costes Iniciales totales de la ruta.

El VAN se calculará para cada ruta y para la red completa, permitiendo identificar cuáles son más rentables bajo cada escenario.

- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** La Tasa Interna de Retorno (TIR) es el tipo de descuento que iguala el VAN a cero. Este indicador mide la rentabilidad implícita del proyecto y permite comparar las rutas entre sí. Un valor de TIR superior al 10% indicará que la ruta es viable bajo las condiciones propuestas.

$$\sum_{n=0}^N \frac{FCb(\text{Año } n)}{(1+TIR)^n} = 0$$

El análisis de la TIR complementará el cálculo del VAN, proporcionando una perspectiva adicional sobre el retorno esperado.

- **Retorno sobre la Inversión (ROI):** El Retorno sobre la Inversión (ROI) mide la relación entre los beneficios acumulados y la inversión inicial, expresado en porcentaje. Es un indicador útil para evaluar la eficiencia de las inversiones realizadas en las diferentes rutas.

$$ROI = \frac{FCb \text{ acumulado}(\text{Año } n + 10)}{FCb(\text{Año } n)}$$

El ROI se analizará al término del horizonte temporal (10 años), tanto para las rutas individuales como para la red completa.

- **Cálculo Integral de la Red Completa:** Adicionalmente, se consolidarán los resultados de todas las rutas para evaluar la viabilidad económica de la red completa de vertipueros y rutas. Esto incluirá:
 1. La suma de los costes iniciales de todas las rutas.
 2. La agregación de los flujos de caja anuales.
 3. El cálculo del VAN, TIR y ROI para la red como un modelo único.

6.2.1 Escenario con Pilotos

El flujo de caja bruto acumulado (Que también podría denominarse directamente como “caja acumulada”) se calcula para cada una de las rutas considerando los ingresos operativos anuales y los costes operativos correspondientes. Este cálculo permite determinar el momento en el que se alcanza el punto de equilibrio y se empiezan a generar rentabilidades positivas:

Caja acumulada Escenario Baseline con Pilotos											
Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01	-7.549.665	-3.722.095	1.055.475	6.833.045	13.560.615	21.238.185	28.915.755	36.593.325	44.270.895	51.948.465	59.626.035
RP02	-14.095.780	-11.298.350	-7.550.920	-2.803.490	2.893.940	9.541.370	16.188.800	22.836.230	29.483.660	36.131.090	42.778.520
RC01	-10.785.325	-8.879.985	-6.284.645	-2.999.305	976.035	5.641.375	10.306.715	14.972.055	19.637.395	24.302.735	28.968.075
RC02	-7.924.910	-4.895.710	-1.056.510	3.582.690	9.031.890	15.281.090	21.530.290	27.779.490	34.028.690	40.277.890	46.527.090
RT01	-9.164.500	-6.864.000	-3.873.500	-203.000	4.157.500	9.198.000	14.238.500	19.279.000	24.319.500	29.360.000	34.400.500
RM01	-4.302.835	61.110	4.425.055	8.789.000	13.152.945	17.516.890	21.880.835	26.244.780	30.608.725	34.972.670	39.336.615

Tabla 32. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline con pilotos.

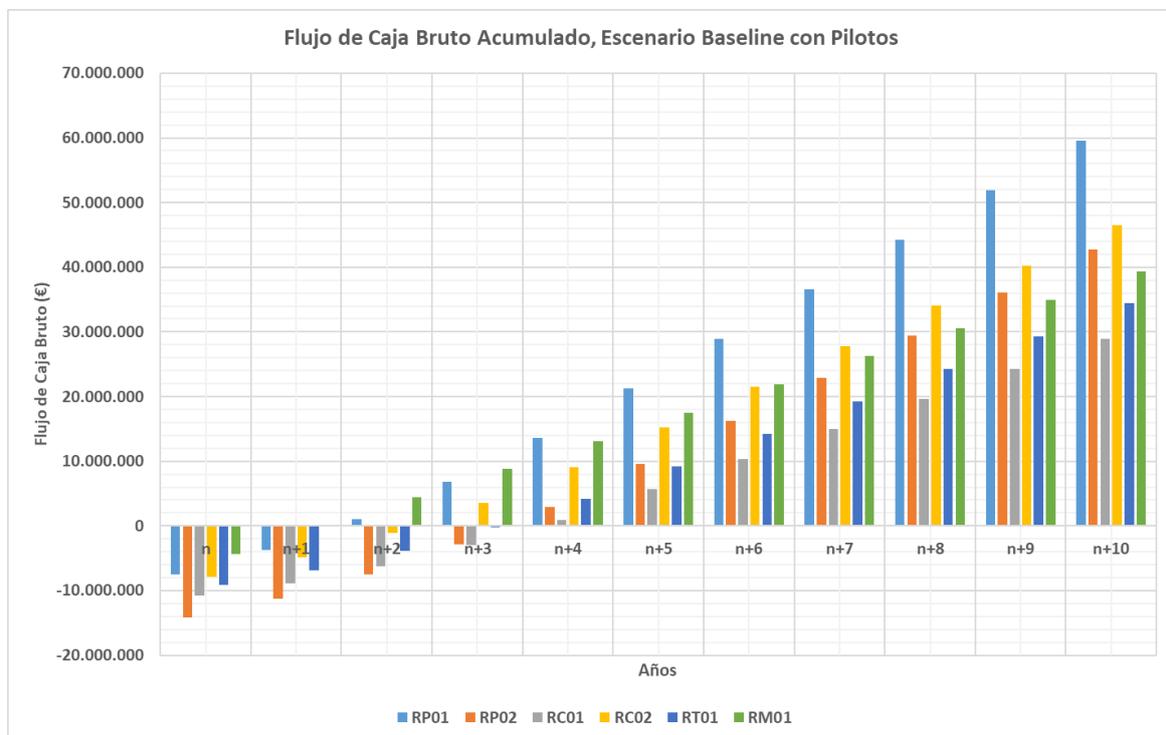


Imagen 53. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline con pilotos.

El análisis del flujo de caja bruto acumulado en el escenario baseline con pilotos revela varios aspectos clave sobre la viabilidad financiera de las rutas propuestas en la red de vertipuertos. Las rutas RP01 (Aeropuerto-Torre Picasso) y RC02 (Aeropuerto-Torre Picasso para carga) se destacan como las más rentables, generando un flujo de caja significativamente positivo a partir del cuarto año de operación. En términos generales, la mayoría de las rutas alcanzan rentabilidad positiva en el año n+4, lo que sugiere que el modelo requiere un periodo inicial de maduración para absorber los altos costes iniciales y estabilizar la operación.

Es importante señalar que solo las rutas RP01 y RM01 (La Paz-Barajas-12 de Octubre) logran resultados positivos ya desde el segundo año, lo que evidencia su potencial para generar ingresos rápidamente gracias a la alta frecuencia y tarifas atractivas de sus servicios. Por otro lado, algunas rutas como RP02 (Aeropuerto-Atocha), RC01 (Mercamadrid-Torre Picasso para

carga) y RT01 (Madrid Río-Turismo) requieren un horizonte más largo para alcanzar flujos positivos, especialmente en los primeros tres años, reflejando mayores costes iniciales y operativos.

En conclusión, el modelo de negocio plantea una transición hacia la sostenibilidad financiera tras un periodo inicial de ajustes y consolidación. La implementación de aeronaves autónomas en el futuro tiene el potencial de mejorar aún más la rentabilidad al reducir los costes operativos significativamente, fortaleciendo el atractivo económico de las rutas menos rentables en los primeros años de operación.

Se incluyen también estos mismos resultados para el escenario optimista:

Caja acumulada Escenario Optimista con Pilotos											
Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01	-6.109.665	-557.095	6.230.475	14.318.045	23.640.615	34.198.185	44.755.755	55.313.325	65.870.895	76.428.465	86.986.035
RP02	-12.655.780	-8.133.350	-2.375.920	4.681.510	12.973.940	22.501.370	32.028.800	41.556.230	51.083.660	60.611.090	70.138.520
RC01	-9.750.325	-6.602.985	-2.558.645	2.382.695	8.221.035	14.956.375	21.691.715	28.427.055	35.162.395	41.897.735	48.633.075
RC02	-6.715.910	-2.237.710	3.293.490	9.864.690	17.488.890	26.153.090	34.817.290	43.481.490	52.145.690	60.809.890	69.474.090
RT01	-8.138.500	-4.608.000	-180.500	5.131.000	11.339.500	18.432.000	25.524.500	32.617.000	39.709.500	46.802.000	53.894.500
RM01	-2.658.835	3.349.110	9.357.055	15.365.000	21.372.945	27.380.890	33.388.835	39.396.780	45.404.725	51.412.670	57.420.615

Tabla 33. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista con pilotos.

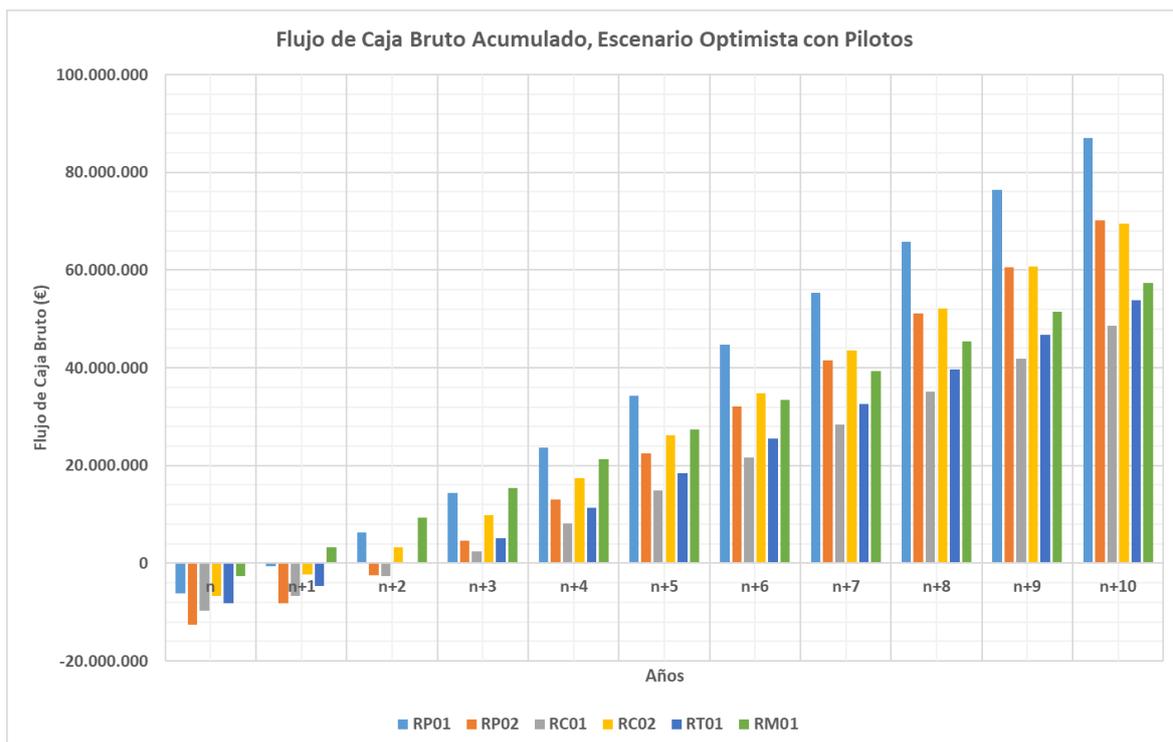


Imagen 54. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista con pilotos.

Y para el escenario pesimista:

Caja acumulada Escenario Pesimista con Pilotos											
Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01	-8.989.665	-6.887.095	-4.119.525	-651.955	3.480.615	8.278.185	13.075.755	17.873.325	22.670.895	27.468.465	32.266.035
RP02	-15.535.780	-14.463.350	-12.725.920	-10.288.490	-7.186.060	-3.418.630	348.800	4.116.230	7.883.660	11.651.090	15.418.520
RC01	-11.820.325	-11.156.985	-10.010.645	-8.381.305	-6.268.965	-3.673.625	-1.078.285	1.517.055	4.112.395	6.707.735	9.303.075
RC02	-9.133.910	-7.553.710	-5.406.510	-2.699.310	574.890	4.409.090	8.243.290	12.077.490	15.911.690	19.745.890	23.580.090
RT01	-10.190.500	-9.120.000	-7.566.500	-5.537.000	-3.024.500	-36.000	2.952.500	5.941.000	8.929.500	11.918.000	14.906.500
RM01	-5.946.835	-3.226.890	-506.945	2.213.000	4.932.945	7.652.890	10.372.835	13.092.780	15.812.725	18.532.670	21.252.615

Tabla 34. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista con pilotos.

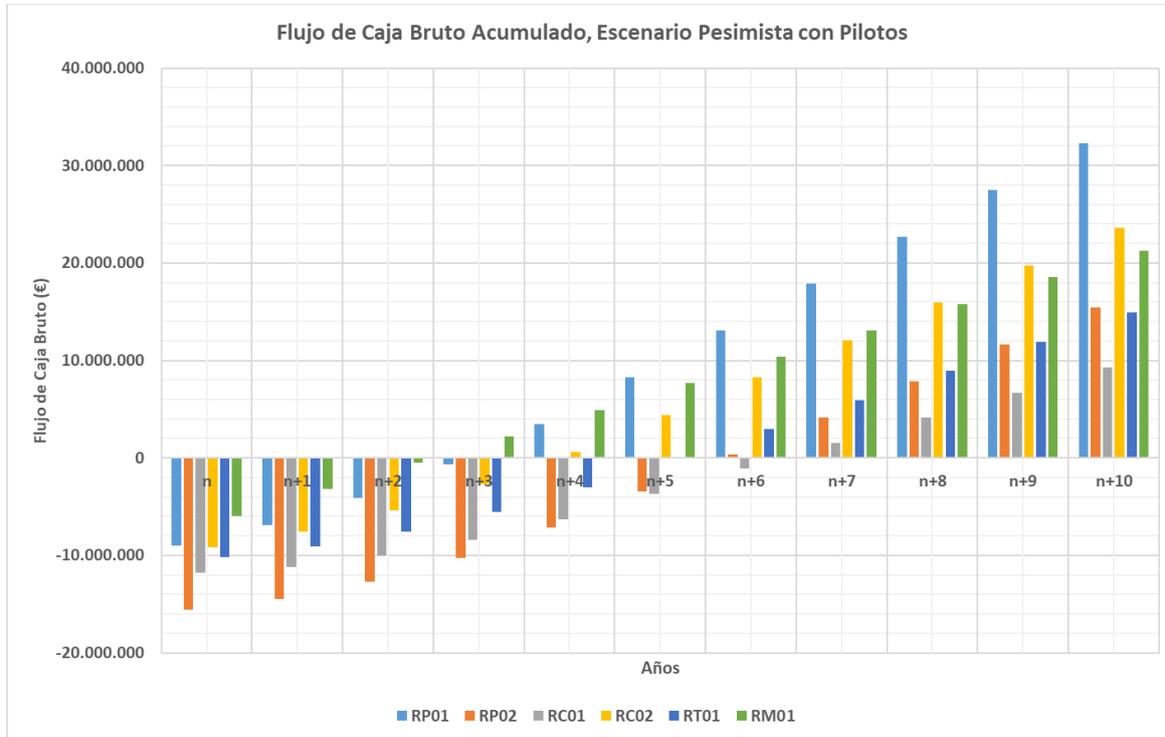


Imagen 55. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista con pilotos.

En el escenario optimista, las rutas muestran un rendimiento financiero más favorable, con varias alcanzando flujos positivos desde el segundo o tercer año. Destacan especialmente las rutas RP01 y RC02 por su sólida capacidad de generar caja acumulada, incluso en los primeros años de operación. Este escenario resalta el potencial del modelo de negocio bajo condiciones económicas y operativas favorables, posicionando la red de vertipuertos como una inversión viable y de rápido retorno en contextos óptimos.

Por el contrario, el escenario pesimista refleja desafíos importantes en los primeros años, donde la mayoría de las rutas generan flujos negativos hasta el año n+4 o n+5. Las rutas RP01 y RM01 continúan destacándose, aunque con márgenes más ajustados, mientras que rutas como RP02 y RC01 enfrentan dificultades más pronunciadas, especialmente en los primeros años de operación. Este escenario subraya la necesidad de estrategias de mitigación de riesgos y ajustes en el diseño operativo para garantizar la sostenibilidad financiera.

En ambos escenarios, las rutas RP01 y RC02 mantienen un desempeño sobresaliente, lo que refuerza su importancia estratégica dentro del modelo de negocio. La implementación de

tecnologías autónomas y una gestión eficiente de los vertipuertos podrían ser claves para minimizar los riesgos y maximizar la rentabilidad en todos los escenarios.

A continuación, se mostrarán algunos de los resultados para algunas métricas financieras. El VAN se calcula utilizando una tasa de descuento del 10%, reflejando el coste de oportunidad del capital y el riesgo asociado al proyecto. El análisis del VAN muestra qué rutas son más rentables bajo las condiciones establecidas en cada escenario.

La TIR para cada ruta se calcula como la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Este indicador permite evaluar qué rutas ofrecen una mayor rentabilidad relativa frente a la tasa de descuento aplicada.

Por último, el ROI se calcula al final del horizonte temporal de 10 años para cada ruta, mostrando la relación entre los beneficios generados y la inversión inicial. Este indicador es especialmente útil para evaluar la eficiencia de las inversiones realizadas. Los resultados son los siguientes:

Escenario Baseline con Pilotos			
Ruta	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
RP01	31.652.624	66,74%	789,78%
RP02	18.776.745	31,24%	303,48%
RC01	12.153.241	28,35%	268,59%
RC02	23.798.683	52,81%	587,10%
RT01	16.128.316	37,21%	375,37%
RM01	22.511.718	101,33%	914,20%

Tabla 35. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario baseline con pilotos.

Las rutas RP01 y RC02 presentan los valores más altos en las tres métricas, confirmando su viabilidad financiera y su capacidad para generar retornos consistentes en un horizonte de diez años. Estas rutas no solo son rentables, sino que también tienen una TIR que supera significativamente el coste de capital asumido, lo que las convierte en pilares estratégicos del modelo.

Por otro lado, las rutas como RP02 y RC01 tienen métricas menos favorables, especialmente en términos de ROI, lo que sugiere que su contribución al modelo es más limitada y depende en gran medida de optimizaciones futuras, como la reducción de costes operativos o el aumento de la demanda.

En conjunto, las métricas resaltan la importancia de priorizar rutas con alta rentabilidad y trabajar en estrategias para mejorar el rendimiento de aquellas con valores más ajustados. El escenario baseline refuerza la sostenibilidad del modelo, pero también apunta a la necesidad de adaptaciones para mitigar riesgos y maximizar el impacto económico.

Para evaluar la sensibilidad de las rutas bajo distintas condiciones de demanda, se realiza un análisis comparativo entre los escenarios Baseline, Optimista y Pesimista. Este análisis refleja cómo cambian los indicadores clave (VAN, TIR, ROI) en cada caso:

Escenario Optimista con Pilotos			
Ruta	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
RP01	48.397.061	108,64%	1423,74%
RP02	35.521.181	50,28%	554,20%
RC01	24.189.117	46,28%	498,78%
RC02	37.844.302	83,44%	1034,47%
RT01	28.059.305	58,30%	662,22%
RM01	34.257.386	225,96%	2159,62%

Tabla 36. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario optimista con pilotos.

Escenario Pesimista con Pilotos			
Ruta	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
RP01	14.908.187	35,69%	358,92%
RP02	2.032.308	12,46%	99,25%
RC01	117.366	10,19%	78,70%
RC02	9.753.064	27,56%	258,16%
RT01	4.197.327	17,43%	146,28%
RM01	10.766.050	44,59%	357,38%

Tabla 37. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario pesimista con pilotos.

En el análisis de las métricas de VAN, TIR y ROI para los escenarios optimista y pesimista con pilotos, se pueden extraer conclusiones muy positivas sobre la solidez del modelo de negocio. Incluso en el escenario pesimista, la ruta RC01, que inicialmente podría parecer menos prometedora, alcanza una TIR del 10,19%, superando la tasa de descuento del 10%. Este detalle subraya que, aún bajo condiciones desfavorables, el modelo no solo es viable, sino que tiene un margen para generar valor real.

En el escenario optimista, todas las rutas se posicionan como altamente rentables, destacando especialmente RP01 y RC02, con métricas de VAN, TIR y ROI que reflejan retornos extraordinarios. Estas rutas confirman que el modelo tiene un potencial brutal para ser altamente lucrativo si las condiciones del mercado y las operaciones son favorables. La capacidad del modelo para generar flujos positivos incluso en escenarios menos optimistas demuestra su robustez y su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones económicas.

En resumen, el hecho de que incluso la RC01 supere la tasa de descuento del 10% indica que este modelo de negocio es, sin duda, una propuesta sólida y atractiva. En cualquier escenario, optimista o pesimista, el modelo no solo resiste, sino que se consolida como una estrategia innovadora y rentable.

6.2.2 Escenario sin Pilotos

El Flujo de Caja Bruto Acumulado (O "Caja Acumulada"):

Caja acumulada Escenario Baseline sin Pilotos											
Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01	-7.069.665	-2.762.095	2.495.475	8.753.045	15.960.615	24.118.185	32.275.755	40.433.325	48.590.895	56.748.465	64.906.035
RP02	-13.615.780	-10.338.350	-6.110.920	-883.490	5.293.940	12.421.370	19.548.800	26.676.230	33.803.660	40.931.090	48.058.520
RC01	-9.615.325	-6.369.985	-2.324.645	2.540.695	8.236.035	14.761.375	21.286.715	27.812.055	34.337.395	40.862.735	47.388.075
RC02	-6.644.910	-2.165.710	3.283.490	9.692.690	17.071.890	25.411.090	33.750.290	42.089.490	50.428.690	58.767.890	67.107.090
RT01	-8.924.500	-6.384.000	-3.153.500	757.000	5.357.500	10.638.000	15.918.500	21.199.000	26.479.500	31.760.000	37.040.500
RM01	-3.942.835	781.110	5.505.055	10.229.000	14.952.945	19.676.890	24.400.835	29.124.780	33.848.725	38.572.670	43.296.615

Tabla 38. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline sin pilotos.

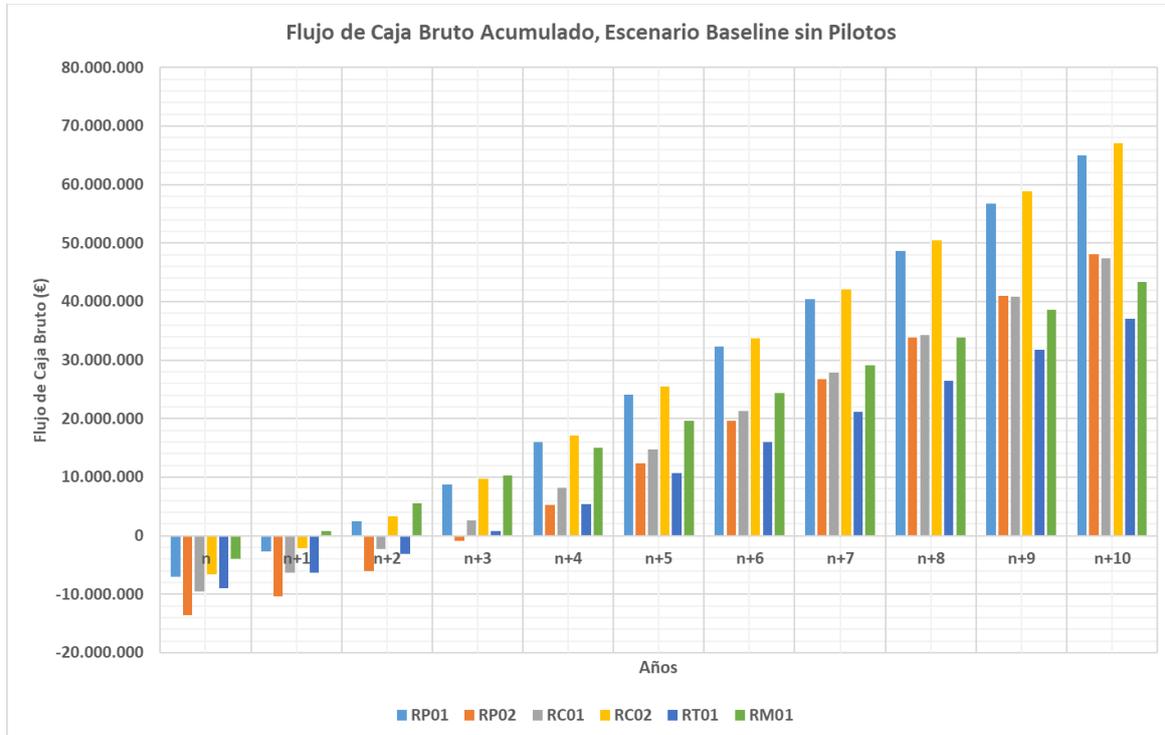


Imagen 56. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario baseline sin pilotos.

En el escenario baseline sin pilotos, se observa una notable mejora en el flujo de caja bruto acumulado para todas las rutas, evidenciando el impacto positivo de la reducción de los costes operativos asociados al personal. Este ahorro es especialmente relevante en las rutas de carga (RC01 y RC02), donde la eliminación de los pilotos no solo disminuye los gastos operativos, sino que también permite aumentar los ingresos al incrementar la capacidad de carga útil de las aeronaves. Esto posiciona a las rutas de carga como las más beneficiadas en este escenario, consolidándolas como pilares estratégicos en el modelo de negocio, superando la RC02 incluso a la RP01 a largo plazo.

En términos generales, todas las rutas alcanzan flujos positivos antes en comparación con el escenario con pilotos, lo que refuerza la viabilidad del modelo a largo plazo y su capacidad para adaptarse a tecnologías más avanzadas y eficientes.

El Flujo de Caja Bruto acumulado para el escenario optimista:

Caja acumulada Escenario Optimista sin Pilotos											
Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01	-5.629.665	402.905	7.670.475	16.238.045	26.040.615	37.078.185	48.115.755	59.153.325	70.190.895	81.228.465	92.266.035
RP02	-12.175.780	-7.173.350	-935.920	6.601.510	15.373.940	25.381.370	35.388.800	45.396.230	55.403.660	65.411.090	75.418.520
RC01	-8.373.325	-3.627.985	2.157.355	9.008.695	16.939.035	25.948.375	34.957.715	43.967.055	52.976.395	61.985.735	70.995.075
RC02	-5.195.910	1.023.290	8.503.490	17.231.690	27.220.890	38.458.090	49.695.290	60.932.490	72.169.690	83.406.890	94.644.090
RT01	-7.898.500	-4.128.000	539.500	6.091.000	12.539.500	19.872.000	27.204.500	34.537.000	41.869.500	49.202.000	56.534.500
RM01	-2.298.835	4.069.110	10.437.055	16.805.000	23.172.945	29.540.890	35.908.835	42.276.780	48.644.725	55.012.670	61.380.615

Tabla 39. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista sin pilotos.

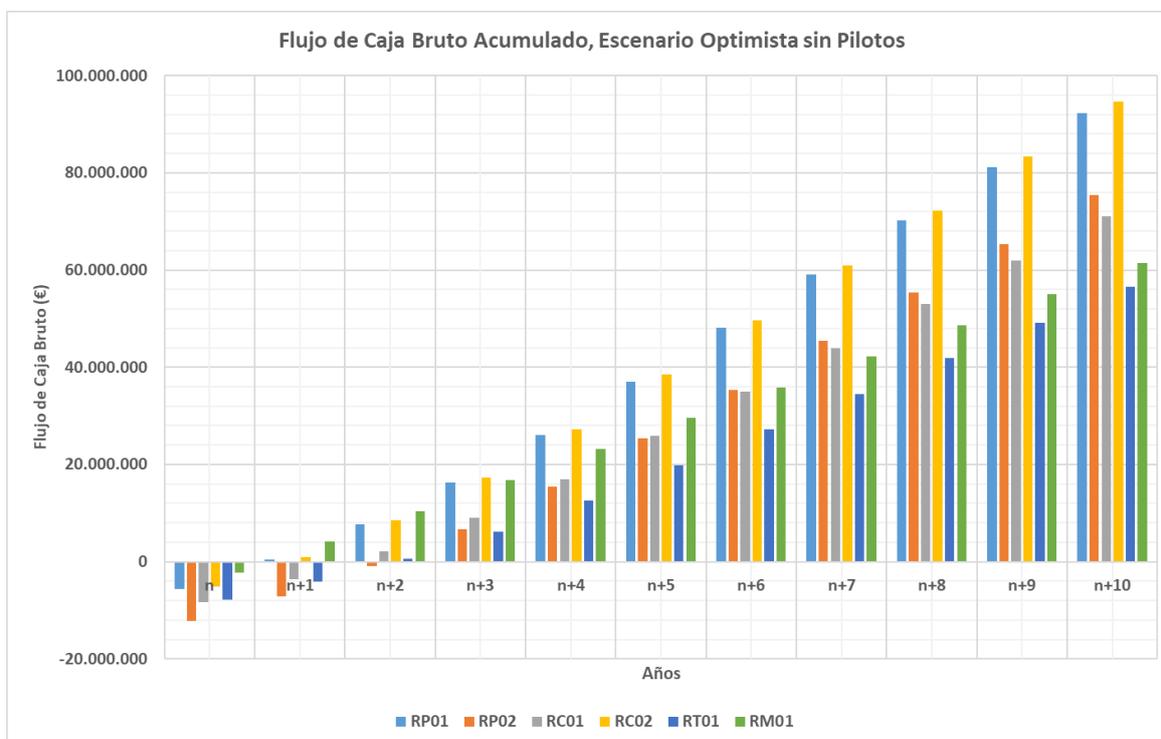


Imagen 57. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario optimista sin pilotos.

En el escenario optimista sin pilotos, el modelo de negocio alcanza un desempeño excepcional, con todas las rutas generando flujos positivos desde los primeros años de operación. Las rutas de carga destacan nuevamente, con incrementos significativos tanto en ingresos como en márgenes de rentabilidad, gracias a la combinación de menores costes y mayores capacidades operativas. Este escenario refleja el enorme potencial del modelo en condiciones ideales, donde la eliminación de los pilotos actúa como un catalizador para maximizar el impacto económico en todos los frentes.

La eliminación de los costes asociados a los pilotos permite acelerar el retorno de la inversión, consolidando las rutas como opciones altamente rentables incluso bajo proyecciones conservadoras.

Y la caja para el escenario pesimista:

Caja acumulada Escenario Pesimista sin Pilotos											
Ruta	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
RP01	-8.509.665	-5.927.095	-2.679.525	1.268.045	5.880.615	11.158.185	16.435.755	21.713.325	26.990.895	32.268.465	37.546.035
RP02	-15.535.780	-13.983.350	-11.765.920	-8.848.490	-5.266.060	-1.018.630	3.228.800	7.476.230	11.723.660	15.971.090	20.218.520
RC01	-10.857.325	-9.111.985	-6.806.645	-3.927.305	-466.965	3.574.375	7.615.715	11.657.055	15.698.395	19.739.735	23.781.075
RC02	-8.093.910	-5.354.710	-1.936.510	2.153.690	6.922.890	12.364.090	17.805.290	23.246.490	28.687.690	34.128.890	39.570.090
RT01	-9.950.500	-8.640.000	-6.846.500	-4.577.000	-1.824.500	1.404.000	4.632.500	7.861.000	11.089.500	14.318.000	17.546.500
RM01	-5.586.835	-2.506.890	573.055	3.653.000	6.732.945	9.812.890	12.892.835	15.972.780	19.052.725	22.132.670	25.212.615

Tabla 40. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista sin pilotos.

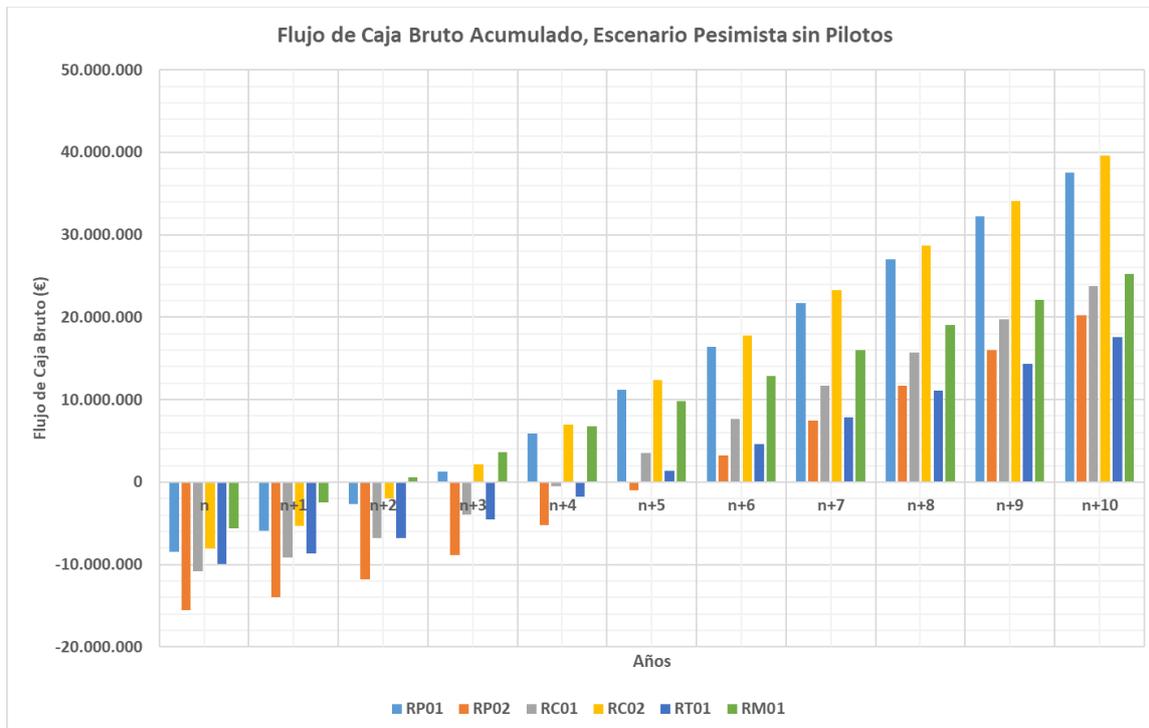


Imagen 58. Caja acumulada de cada ruta, por años, en el escenario pesimista sin pilotos.

En el escenario pesimista sin pilotos, aunque los resultados son más ajustados que en el optimista, se observa una mejora general respecto al escenario con pilotos. Las rutas de carga siguen siendo las más beneficiadas, demostrando una mayor resiliencia incluso en condiciones adversas, gracias a los beneficios combinados de menores costes y mayores ingresos por carga.

Las rutas de pasajeros, aunque enfrentan mayores desafíos en este escenario, logran alcanzar flujos positivos más rápidamente en comparación con la versión con pilotos, lo que refuerza la idea de que la transición hacia la autonomía operativa es clave para la sostenibilidad a largo plazo del modelo.

En general, el escenario pesimista sin pilotos confirma que, a pesar de los retos económicos, el modelo sigue siendo viable y robusto, especialmente en las rutas de carga, que destacan como las más adaptables y rentables.

Se calculan, a su vez, los resultados del VAN, TIR y ROI a 10 años vista para el escenario Baseline:

Escenario Baseline sin Pilotos			
Ruta	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
RP01	35.082.016	76,52%	918,09%
RP02	22.206.137	35,58%	352,96%
RC01	23.634.576	46,53%	492,84%
RC02	36.592.613	83,06%	1009,90%
RT01	17.843.012	40,59%	415,04%
RM01	25.083.762	119,77%	1098,11%

Tabla 41. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario baseline sin pilotos.

En el escenario baseline sin pilotos, las métricas de VAN, TIR y ROI reflejan un incremento significativo en la rentabilidad de todas las rutas comparado con el escenario con pilotos. La reducción de costes operativos debido a la eliminación del personal no solo mejora el margen financiero, sino que también permite alcanzar retornos positivos de manera más temprana. Esto es especialmente evidente en las rutas de carga (RC01 y RC02), donde además de la reducción de costes, el aumento de capacidad de carga incrementa los ingresos, maximizando el impacto económico de estas rutas.

El desempeño general del escenario baseline sin pilotos confirma que la transición hacia aeronaves autónomas no solo es viable, sino también estratégica para optimizar la rentabilidad a largo plazo. Este modelo demuestra que incluso en un entorno conservador, la red de vertipuertos puede sostener un crecimiento sostenido con retornos atractivos.

Y también para los escenarios Optimista y Pesimista:

Escenario Optimista sin Pilotos			
Ruta	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
RP01	51.826.453	124,28%	1638,93%
RP02	38.950.574	55,47%	619,41%
RC01	38.086.034	71,76%	847,87%
RC02	53.447.593	136,78%	1821,51%
RT01	29.774.002	62,49%	715,76%
RM01	36.829.430	277,01%	2670,07%

Tabla 42. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario optimista sin pilotos.

Escenario Pesimista sin Pilotos			
Ruta	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
RP01	18.337.579	42,67%	441,22%
RP02	5.461.700	16,63%	137,48%
RC01	9.183.118	24,47%	219,03%
RC02	19.737.633	46,44%	488,89%
RT01	5.912.023	20,51%	176,34%
RM01	13.338.094	54,41%	451,29%

Tabla 43. Métricas financieras de las distintas rutas a 10 años y un 10% de tasa de descuento en el escenario pesimista sin pilotos.

En el escenario optimista sin pilotos, las métricas de VAN, TIR y ROI se disparan, consolidando la viabilidad excepcional del modelo en condiciones económicas favorables. Todas las rutas alcanzan valores muy superiores al coste de capital, con las rutas de carga nuevamente liderando en rentabilidad debido a la combinación de menores costes operativos y mayores ingresos. Este escenario refleja el máximo potencial del modelo, destacando la importancia de las rutas de carga como pilares estratégicos del negocio.

Por otro lado, en el escenario pesimista sin pilotos, aunque las métricas son más ajustadas, siguen mostrando un rendimiento notablemente mejorado en comparación con el escenario con pilotos. Incluso en condiciones adversas, las rutas de carga (RC01 y RC02) logran mantener VAN positivos y TIR por encima del coste de capital, reafirmando su resiliencia y adaptabilidad. Las rutas de pasajeros, aunque enfrentan mayores desafíos, también logran una mejora significativa gracias a la reducción de costes y la estabilidad de ingresos.

En conjunto, los escenarios optimista y pesimista sin pilotos consolidan la robustez del modelo, mostrando que incluso en los peores casos, la transición a aeronaves autónomas refuerza la sostenibilidad financiera de la red de vertipuertos. Esto no solo valida el enfoque estratégico, sino que también posiciona el modelo como una solución innovadora y rentable para el futuro de la movilidad aérea urbana.

6.3 Proyecciones Financieras Detalladas de la Red

Se podría considerar que para inversores con mayor disponibilidad de capital puede reducir el riesgo total del proyecto la inversión en la red completa incorporando todas las rutas. Esto es debido al potencial amortiguamiento de la rentabilidad mayor o menor de la esperada, derivada de las incertidumbres de la aplicación práctica de cada una de las rutas. Es por ello que se procede también a hacer todos los cálculos considerando toda la red de vertipuertos en sí.

6.3.1 Escenario con Pilotos

Se observan los siguientes Flujos de Caja Brutos Acumulados a lo largo de los años para cada uno de los escenarios:

Caja Acumulada Con Pilotos											
Escenario	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
Baseline	-53.823.015	-35.599.030	-13.285.045	13.198.940	43.772.925	78.416.910	113.060.895	147.704.880	182.348.865	216.992.850	251.636.835
Optimista	-46.029.015	-18.790.030	13.765.955	51.742.940	95.036.925	143.621.910	192.206.895	240.791.880	289.376.865	337.961.850	386.546.835
Pesimista	-61.617.015	-52.408.030	-40.336.045	-25.345.060	-7.491.075	13.211.910	33.914.895	54.617.880	75.320.865	96.023.850	116.726.835

Tabla 44. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, con pilotos.

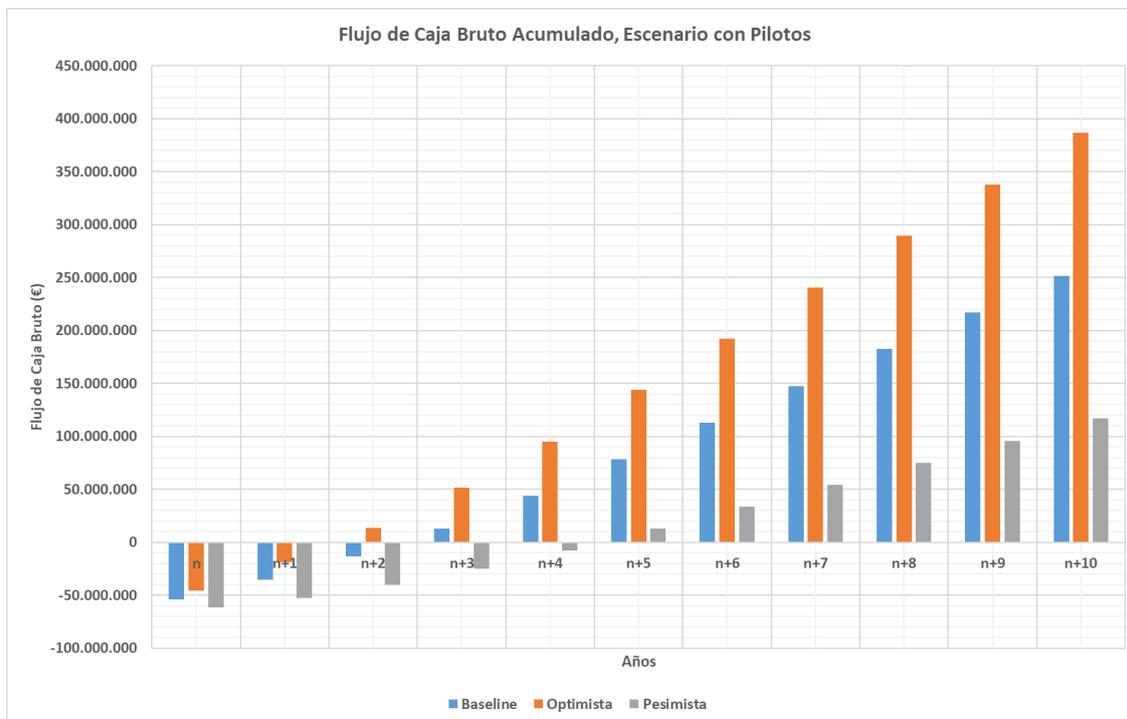


Imagen 59. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, con pilotos.

También se observan los siguientes valores de las métricas financieras a 10 años con una tasa de descuento del 10%:

Escenario	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
Baseline	251.636.835	45,39%	467,53%
Optimista	386.546.835	72,88%	839,79%
Pesimista	116.726.835	21,98%	189,44%

Tabla 45. Métricas financieras la red completa a 10 años y un 10% de tasa de descuento, con pilotos.

El análisis de la red completa de vertipuertos muestra que, para inversores con mayor disponibilidad de capital, invertir en todas las rutas puede reducir el riesgo total del proyecto. Esto se debe al efecto amortiguador que proporciona la diversificación, mitigando posibles desviaciones en la rentabilidad esperada de las rutas individuales debido a incertidumbres operativas.

Los flujos de caja brutos acumulados en los diferentes escenarios destacan el impacto positivo del enfoque integral, con el escenario optimista alcanzando cifras superiores, mientras que el baseline muestra un crecimiento constante y el escenario pesimista asegura una mínima

viabilidad en el largo plazo. Los valores financieros a 10 años refuerzan esta conclusión, con un VAN positivo incluso en el peor caso, una TIR competitiva y un ROI que justifica la inversión.

El enfoque en la red completa demuestra que, aunque algunas rutas puedan no alcanzar los mismos niveles de rentabilidad, la complementariedad de los ingresos y la distribución de los costes operativos entre las rutas fortalecen la estabilidad financiera del proyecto en su conjunto.

6.3.2 Escenario sin Pilotos

Se observan los siguientes Flujos de Caja Brutos Acumulados a lo largo de los años para cada uno de los escenarios:

Caja Acumulada Sin Pilotos											
Escenario	n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10
Baseline	-49.813.015	-27.239.030	-305.045	31.088.940	66.872.925	107.026.910	147.180.895	187.334.880	227.488.865	267.642.850	307.796.835
Optimista	-41.572.015	-9.434.030	28.371.955	71.975.940	121.286.925	176.278.910	231.270.895	286.262.880	341.254.865	396.246.850	451.238.835
Pesimista	-61.617.015	-52.408.030	-40.336.045	-25.345.060	-7.491.075	13.211.910	33.914.895	54.617.880	75.320.865	96.023.850	116.726.835

Tabla 46. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, sin pilotos.

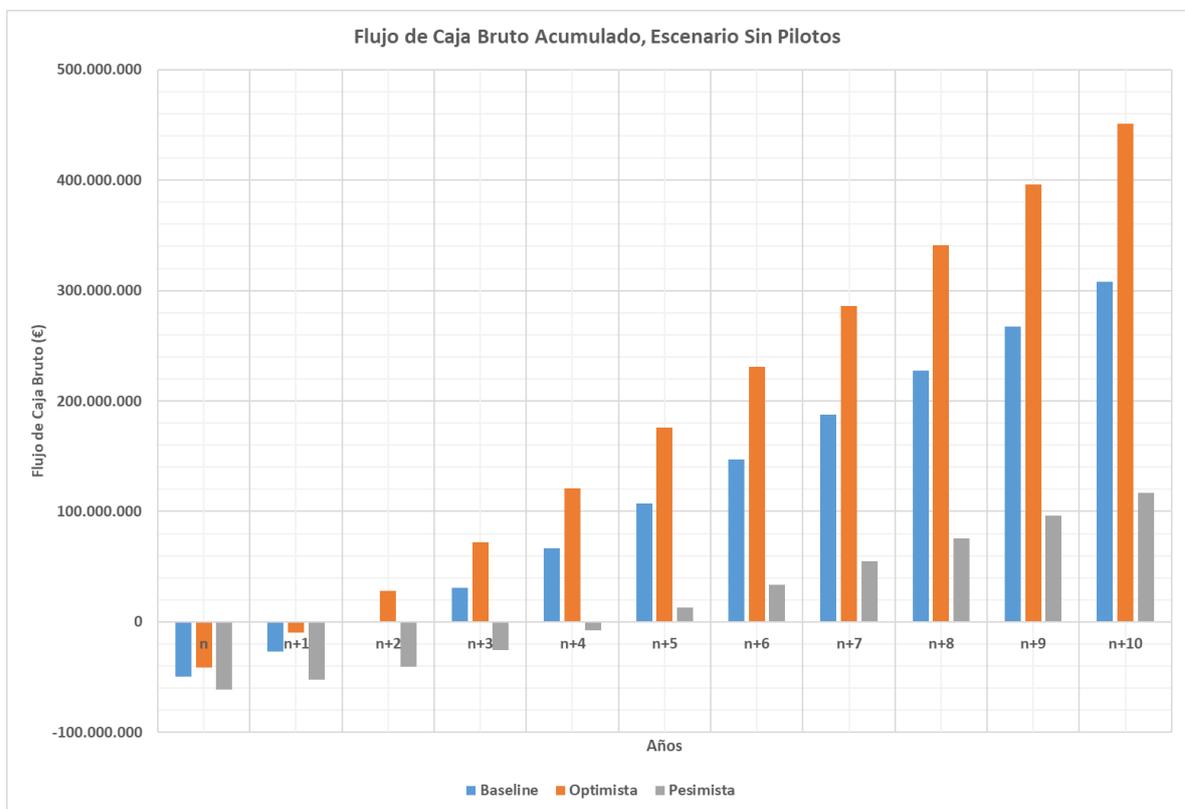


Imagen 60. Caja acumulada de la red para cada escenario, por años, sin pilotos.

También se observan los siguientes valores de las métricas financieras a 10 años con una tasa de descuento del 10%:

Escenario	VAN (10 años)	TIR	ROI (10 años)
Baseline	307.796.835	57,33%	617,90%
Optimista	451.238.835	91,05%	1085,44%
Pesimista	164.354.835	30,76%	283,11%

Tabla 47. Métricas financieras la red completa a 10 años y un 10% de tasa de descuento, sin pilotos.

En el escenario sin pilotos, los resultados financieros para la red completa son aún más sólidos, reforzando el atractivo de este enfoque para inversores con capacidad de asumir proyectos de gran envergadura. La eliminación de los costes asociados a los pilotos reduce significativamente los riesgos financieros y mejora la rentabilidad general de la red. Esto es especialmente notable en los escenarios baseline y optimista, donde los flujos de caja bruto s acumulados muestran un crecimiento acelerado en comparación con el modelo con pilotos.

El análisis de las métricas financieras a 10 años destaca una mejora sustancial en el VAN, TIR y ROI en todos los escenarios. La eliminación de pilotos no solo reduce los costes, sino que permite aumentar la flexibilidad operativa, lo que resulta en una mayor estabilidad para enfrentar posibles fluctuaciones en la demanda.

En conclusión, la inversión en la red completa sin pilotos no solo amplifica las ventajas de la diversificación, sino que también asegura una rentabilidad robusta en todos los escenarios analizados, consolidando el modelo como una opción estratégica y de bajo riesgo para el futuro de la movilidad aérea urbana.

6.4 Evaluación de Riesgos y Planes de Mitigación

La implementación del modelo de negocio descrito en el TFM implica riesgos significativos, derivados tanto de la naturaleza innovadora de la tecnología como de los numerosos factores regulatorios, financieros y operativos que afectan al proyecto. A continuación, se identifican los riesgos más relevantes, sus posibles impactos y las estrategias propuestas para su mitigación. Cabe destacar que varios de estos riesgos han sido ya contemplados en el modelo de negocio, con mitigaciones incorporadas durante su diseño.

1. Dificultades regulatorias

- **Riesgo:** La falta de un marco normativo claro y uniforme en España y Europa podría retrasar la aprobación y certificación de vertipuertos y operaciones de eVTOL.
- **Impacto:** Retraso en la implementación del proyecto, aumento de costos operativos y dificultades para garantizar la seguridad y confiabilidad de las operaciones.
- **Planes de mitigación:**
 - **Alianzas con socios internacionales:** Colaborar con empresas líderes en el sector, como EHang o Volocopter, que cuentan con experiencia en proyectos similares en países con regulaciones avanzadas (China, Estados Unidos).

- **Participación activa en mesas técnicas:** Involucrarse en los grupos de trabajo de la EASA y otros organismos para influir en el desarrollo de normativas adecuadas.
- **Recursos financieros:** Asignar fondos específicos para adaptar el proyecto a los cambios regulatorios imprevistos y contratar expertos en legislación aeronáutica.

2. Falta de financiación

- **Riesgo:** La elevada inversión inicial requerida para el diseño, construcción y operación de vertipuertos podría dificultar la captación de inversores.
- **Impacto:** Retraso en el despliegue del proyecto, limitación del alcance inicial y posibles problemas de liquidez.
- **Planes de mitigación:**
 - **Implementación gradual:** Priorizar rutas altamente rentables y sinérgicas, como la RP01, para demostrar rentabilidad temprana.
 - **Frameworks de financiación escalonada:** Crear modelos de inversión progresiva, permitiendo retornos parciales en fases iniciales del proyecto.
 - **Estrategias de participación público-privada:** Como se detalla en el apartado 5.4.1, fomentar colaboraciones público-privadas mediante contratos de concesión y financiación compartida, atrayendo tanto capital institucional como fondos de cohesión europeos.
 - **Plan de comunicación:** Presentar proyecciones de retorno de inversión respaldadas por el análisis financiero y estudios de mercado.

3. Demanda menor a la esperada

- **Riesgo:** La adopción de la UAM por parte del público podría ser inferior a las proyecciones iniciales, debido a factores como costos percibidos, preocupaciones de seguridad o impacto ambiental.
- **Impacto:** Menor utilización de las rutas y servicios, afectando la rentabilidad del proyecto.
- **Planes de mitigación:**
 - **Encuestas de demanda:** Realizar estudios de mercado periódicos para ajustar estrategias comerciales.
 - **Reducción inicial de precios:** Ofrecer tarifas competitivas durante los primeros años, con un incremento gradual a medida que aumente la confianza del público.
 - **Marketing y publicidad:** Asignar un presupuesto significativo a campañas publicitarias que promuevan los beneficios del servicio y refuercen su imagen de seguridad y sostenibilidad.
 - **Diversificación de servicios:** Incorporar rutas turísticas o logísticas para ampliar la base de usuarios.

4. Fallos técnicos y operativos

- **Riesgo:** Los eVTOL o los sistemas de vertipuertos podrían experimentar problemas técnicos, afectando la seguridad y confiabilidad del servicio.

- **Impacto:** Interrupciones en el servicio, pérdida de confianza del público y posibles consecuencias legales.
- **Planes de mitigación:**
 - **Contratación de seguros:** Incluir seguros integrales para cubrir fallos mecánicos y posibles accidentes.
 - **Planes de mantenimiento preventivo:** Diseñar y ejecutar un programa riguroso de inspección y mantenimiento de aeronaves e infraestructuras.
 - **Protocolos de emergencia:** Desarrollar procedimientos claros para la gestión de fallos y garantizar la seguridad de los pasajeros y operarios.

5. Rechazo social y ambiental

- **Riesgo:** La percepción negativa del público respecto al ruido, el impacto visual o la sostenibilidad podría generar oposición.
- **Impacto:** Obstáculos para la aprobación de proyectos, retrasos en la implementación y necesidad de rediseños costosos.
- **Planes de mitigación:**
 - **Encuestas comunitarias:** Consultar a los residentes locales para identificar y abordar preocupaciones específicas.
 - **Mitigación de ruido:** Utilizar tecnologías avanzadas de reducción de ruido en los eVTOL y vertipuertos.
 - **Campañas de educación:** Informar al público sobre los beneficios sociales y medioambientales del proyecto, como la reducción de emisiones de carbono.
 - **Diseño sostenible:** Integrar vertipuertos con soluciones arquitectónicas que minimicen el impacto visual y se adapten al entorno urbano.

6. Competencia y barreras tecnológicas

- **Riesgo:** La rápida evolución tecnológica podría dejar obsoletas ciertas soluciones adoptadas en el proyecto o aumentar la competencia de actores internacionales.
- **Impacto:** Pérdida de competitividad, aumento de costos para adaptarse a nuevas tecnologías y riesgo de retraso en el despliegue del modelo de negocio.
- **Planes de mitigación:**
 - **Vigilancia tecnológica:** Mantener un monitoreo constante de los avances en eVTOL y vertipuertos.
 - **Alianzas estratégicas:** Colaborar con startups e institutos de investigación para garantizar el acceso a innovaciones tecnológicas.
 - **Flexibilidad en el diseño:** Incorporar modularidad y capacidad de actualización en los sistemas implementados.

Para cada escenario adverso identificado, se establecerá un plan de acción detallado que permita mitigar su impacto de manera efectiva. Las medidas incluirán:

- **Monitoreo continuo:** Uso de indicadores clave de rendimiento (KPI) para identificar problemas emergentes.

- **Equipos de respuesta rápida:** Creación de grupos interdisciplinarios para abordar situaciones críticas en tiempo real.
- **Revisión periódica:** Evaluar y actualizar los planes de mitigación con base en los resultados obtenidos y los cambios en el entorno.

Riesgo	Impacto	Planes de mitigación
Dificultades regulatorias	Retrasos y sobrecostos	Alianzas con socios, participación en mesas técnicas, asignación de recursos
Falta de financiación	Problemas de liquidez y alcance	Implementación gradual, frameworks escalonados, colaboraciones público-privadas
Demanda menor a la esperada	Baja utilización del servicio	Encuestas, precios competitivos, marketing, diversificación de servicios
Fallos técnicos y operativos	Interrupciones y daño reputacional	Seguros, mantenimiento preventivo, protocolos de emergencia
Rechazo social y ambiental	Retrasos y oposición	Encuestas comunitarias, mitigación de ruido, campañas de educación, diseño sostenible
Competencia tecnológica	Obsolescencia y pérdida de competitividad	Vigilancia tecnológica, alianzas, flexibilidad en el diseño

Tabla 48. Tabla Resumen de Riesgos, Impactos y Mitigaciones.

La combinación de estas estrategias asegura una aproximación robusta y flexible a los riesgos inherentes al modelo de negocio de la UAM, maximizando la probabilidad de éxito en su implementación.

7 Consideraciones Tecnológicas y de Innovación

El desarrollo e implementación de la Movilidad Aérea Urbana (UAM) está intrínsecamente vinculado al avance en tecnologías innovadoras. Estas no solo facilitan la viabilidad técnica y operativa del proyecto, sino que también determinan su impacto en aspectos como sostenibilidad, seguridad y eficiencia. Este capítulo explora las áreas clave de innovación tecnológica y su integración en el modelo de negocio de la UAM.

Las innovaciones en los vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL), los sistemas de gestión de tráfico aéreo urbano (U-Space) y las infraestructuras tecnológicas y energéticas son pilares fundamentales para garantizar que los vertipuertos y las operaciones de UAM cumplan con los más altos estándares de rendimiento y adaptabilidad. A continuación, se analizan estos aspectos, subrayando su importancia para la consolidación de un ecosistema de movilidad aérea urbana robusto y sostenible.

7.1 Innovaciones en eVTOL y Sistemas de Propulsión

El progreso en las tecnologías de eVTOL y sus sistemas de propulsión ha sido un motor clave para el desarrollo de la Movilidad Aérea Urbana (UAM). Estas innovaciones no solo impulsan la viabilidad técnica del modelo, sino que también abren nuevas oportunidades para optimizar la sostenibilidad, eficiencia y seguridad de las operaciones en el medio plazo. A continuación, se destacan los avances y potenciales avances más relevantes en estas áreas y su impacto en el modelo de negocio.

7.1.1 Avances en Propulsión Eléctrica

La propulsión eléctrica constituye el núcleo tecnológico de los eVTOL, siendo el principal factor diferenciador frente a las aeronaves convencionales y los modos de transporte terrestre. Los avances en esta área buscan superar los desafíos de autonomía, eficiencia energética y sostenibilidad, que son críticos para garantizar la viabilidad operativa y comercial de la movilidad aérea urbana. Además, estas innovaciones están sentando las bases para un modelo de transporte aéreo más limpio, silencioso y accesible. A continuación, se analizan las principales áreas de desarrollo en el campo de la propulsión eléctrica.

- **Baterías de Alta Densidad Energética:** Los avances en tecnologías de almacenamiento energético, como las baterías de iones de litio y las de estado sólido, han sido fundamentales para mejorar la autonomía y reducir el peso de los eVTOL. Estas innovaciones logran un equilibrio óptimo entre rendimiento, sostenibilidad y viabilidad económica.
 - **Baterías emergentes:** Tecnologías en desarrollo, como las baterías de litio-azufre y las de metal-aire, prometen ampliar aún más la capacidad de vuelo. Estas ofrecen mayor densidad energética, lo que permite a las aeronaves recorrer distancias más largas con una menor necesidad de recargas frecuentes, optimizando así los costos operativos.

- **Impacto operativo:** Al aumentar la capacidad de almacenamiento, se reduce la dependencia de infraestructuras de carga, lo que favorece la implementación en áreas urbanas y suburbanas con limitaciones energéticas.
- **Motores Eléctricos Distribuidos:** La integración de motores distribuidos en los eVTOL representa una de las mejoras tecnológicas más significativas en términos de seguridad y eficiencia.
 - **Redundancia operativa:** Este diseño permite que la aeronave mantenga la estabilidad y continúe operando con normalidad incluso si uno o más motores fallan, aumentando así la seguridad del sistema.
 - **Reducción del impacto ambiental:** Los motores distribuidos generan menos ruido y vibraciones, lo que disminuye significativamente el impacto acústico en las áreas urbanas. Esto, a su vez, mejora la aceptación social de los eVTOL como solución de movilidad aérea.
 - **Optimización del rendimiento:** La eficiencia de estos motores también contribuye a una mejor utilización de la energía almacenada, ampliando la autonomía y reduciendo los costos asociados.
- **Mejora de la Eficiencia y Fuentes Alternativas de Energía:** La combinación de innovaciones en motores, baterías y operaciones está impulsando una optimización integral del rendimiento de los eVTOL.
 - **Optimización de motores:** Los avances en el diseño y la eficiencia de los motores permiten un menor consumo de energía por kilómetro recorrido, maximizando la capacidad de carga y la autonomía.
 - **Battery Swaps y eficiencia operacional:** La implementación de sistemas de intercambio rápido de baterías (Battery Swaps) y la mejora en la gestión energética permiten a los eVTOL realizar más trayectos con menos interrupciones, aumentando la productividad y viabilidad comercial.
 - **Exploración de fuentes alternativas:** Aunque actualmente las baterías dominan el mercado, se están investigando fuentes alternativas, como el hidrógeno o sistemas híbridos, para extender aún más el alcance operativo y reducir la huella de carbono. Estas tecnologías podrían revolucionar las posibilidades de los eVTOL en el futuro.

7.1.2 Diseños Aerodinámicos y Configuraciones Innovadoras

El diseño aerodinámico y las configuraciones estructurales de los eVTOL están en constante evolución para abordar los retos específicos de la movilidad aérea urbana. Estas innovaciones buscan maximizar la eficiencia energética, mejorar la maniobrabilidad y adaptarse a los diversos entornos operativos en los que se desplegarán estos vehículos. A continuación, se destacan las principales áreas de desarrollo.

- **Configuraciones Multirrotor e Híbridas:** La ingeniería de los eVTOL ha dado lugar a configuraciones que combinan lo mejor de dos mundos: la flexibilidad de los helicópteros y la eficiencia de las aeronaves de ala fija.
 - **Tiltrotors y Lift-and-Cruise:** Estas configuraciones permiten que los rotores cambien de posición durante el vuelo para optimizar las fases de despegue y

- aterrizaje vertical, mientras utilizan alas fijas para un vuelo más eficiente en el modo crucero. Esto resulta en un menor consumo energético y una mayor autonomía operativa.
- **Adaptabilidad urbana:** Estas configuraciones están diseñadas para operar en entornos urbanos densamente poblados, donde la precisión en el despegue y aterrizaje es crucial. La capacidad de realizar maniobras en espacios reducidos aumenta la versatilidad de los eVTOL para misiones tanto de transporte de pasajeros como logísticas.
 - **Eficiencia energética:** El uso combinado de rotores y alas fijas permite minimizar el consumo de energía, especialmente en rutas más largas. Esto es esencial para hacer de los eVTOL una alternativa viable y sostenible frente al transporte terrestre.
 - **Avances en Materiales Estructurales:** Los materiales utilizados en la fabricación de los eVTOL son un componente clave para mejorar su rendimiento general, con especial énfasis en la reducción de peso y la maximización de la capacidad de carga.
 - **Compuestos ligeros:** El uso de materiales como la fibra de carbono, junto con resinas termoestables y otros compuestos avanzados, ha reducido significativamente el peso estructural de estas aeronaves. Esto no solo incrementa la autonomía, sino que también mejora la eficiencia energética general.
 - **Resistencia y durabilidad:** Estos materiales no solo son ligeros, sino que también ofrecen una alta resistencia mecánica y térmica, lo que garantiza un rendimiento fiable en condiciones operativas exigentes. Esto es especialmente relevante en entornos urbanos, donde las aeronaves deben soportar ciclos de operación intensiva.
 - **Sostenibilidad en materiales:** En paralelo, se están desarrollando materiales reciclables o con menor impacto ambiental para alinearse con las crecientes demandas de sostenibilidad en la aviación. Esto incluye el uso de fibras naturales reforzadas y polímeros avanzados de baja huella de carbono.
 - **Optimización Aerodinámica:** Además de las configuraciones y materiales, la optimización aerodinámica desempeña un papel clave en el diseño de los eVTOL:
 - **Reducción de la resistencia al avance:** Se están desarrollando formas más aerodinámicas que minimicen la resistencia al flujo de aire, lo que permite alcanzar velocidades mayores con menor consumo energético.
 - **Innovaciones en control de flujo:** Tecnologías como superficies de control avanzadas y sistemas adaptativos permiten una mayor estabilidad en condiciones de turbulencia, fundamentales para garantizar la seguridad en entornos urbanos densos.

7.1.3 Automatización y Sistemas Autónomos

La automatización y el desarrollo de sistemas autónomos representan una transformación clave en la movilidad aérea urbana (UAM), permitiendo una operación más eficiente, segura y económica. Estas tecnologías no solo reducen costes y mejoran las proyecciones financieras, sino que también potencian la escalabilidad del modelo de negocio, haciendo posible una red

de transporte más densa y compleja en el futuro. Este estudio ya ha considerado el impacto de las aeronaves autónomas, destacando una disminución notable de gastos operativos, especialmente en las rutas de carga, donde la eliminación del piloto libera espacio adicional para mercancías. A continuación, se analizan los principales avances y su impacto en la UAM.

- **Vuelo Autónomo y Control Remoto:** El desarrollo de aeronaves autónomas está revolucionando el sector al eliminar la dependencia de pilotos a bordo, ofreciendo importantes ventajas operativas y financieras.
 - **Reducción de costes:** La ausencia de pilotos elimina gastos relacionados con salarios, formación y certificación, lo que mejora significativamente la rentabilidad operativa. En este estudio, se ha observado un impacto positivo directo en las rutas de carga RC01 y RC02, donde se maximiza el espacio para mercancías al no requerir cabina de tripulación.
 - **Navegación avanzada:** Sensores de última generación, como LIDAR, cámaras de visión artificial y radares, junto con algoritmos de aprendizaje automático, permiten una navegación precisa incluso en escenarios urbanos densamente poblados. Esto mejora la seguridad y eficiencia de las operaciones, reduciendo riesgos asociados al error humano.
 - **Escalabilidad futura:** La implementación de aeronaves autónomas permite ampliar la red de rutas y aumentar la frecuencia de vuelos, maximizando la eficiencia de la infraestructura existente y reduciendo costes marginales por operación.
- **Sistemas de Control y Redundancia Inteligente:** Sistemas de Control y Redundancia Inteligente: La inteligencia artificial (IA) y los sistemas de control avanzados están redefiniendo la gestión del vuelo al integrar capacidades predictivas y redundancias críticas.
 - **Gestión predictiva de vuelo:** Los sistemas basados en IA son capaces de prever y mitigar riesgos, como colisiones o fallos técnicos, antes de que ocurran, aumentando significativamente la seguridad operativa.
 - **Redundancia y confiabilidad:** Los sistemas autónomos incluyen múltiples capas de seguridad que garantizan una operación continua incluso ante fallos parciales. Esto refuerza la confianza en las operaciones no tripuladas, tanto para pasajeros como para mercancías.
 - **Eficiencia mediante U-Space:** Integrar estas tecnologías con el marco U-Space, como se plantea en este estudio, permite gestionar tráfico aéreo de alta densidad de manera automatizada, haciéndolo más rápido, seguro y eficiente.
- **Impacto en el Modelo de Negocio:** La automatización tiene un impacto directo y positivo en la viabilidad financiera y operativa del modelo de negocio y de la UAM en general.
 - **Proyecciones financieras mejoradas:** En las rutas RC01 y RC02, la eliminación de pilotos ha demostrado no solo reducir costes, sino también aumentar los ingresos al liberar espacio adicional para carga. Estos beneficios se amplifican en escenarios de red más extensos con múltiples rutas y mayores volúmenes de operación.

- **Sostenibilidad y aceptación social:** Las operaciones autónomas reducen la huella de carbono y el ruido, lo que favorece la integración en entornos urbanos y mejora la aceptación pública.
- **Ampliación del mercado:** La tecnología autónoma hace viable la expansión hacia mercados rurales o interurbanos, donde la falta de personal o infraestructura sería un obstáculo para modelos tripulados tradicionales.

7.2 Gestión del Tráfico Aéreo Urbano (U-Space)

La operación y gestión del tráfico aéreo para un modelo de movilidad aérea urbana como el que se propone requiere un enfoque adaptado a la naturaleza específica de los eVTOLs y los vertipuertos. Estos elementos plantean retos únicos en términos de espacio aéreo, seguridad y capacidad de gestión de múltiples vehículos en movimiento simultáneamente. Aunque este modelo está diseñado para operar inicialmente con un total de 22 eVTOLs distribuidos en rutas fijadas, su implementación demuestra que puede gestionarse de manera eficiente sin recurrir a sistemas avanzados como el U-Space en fases iniciales.

El concepto U-Space, desarrollado para garantizar una integración segura de drones y aeronaves no tripuladas en el espacio aéreo, proporciona herramientas automatizadas para la gestión de tráfico aéreo. Sin embargo, en este caso, dado que las rutas son estrictamente definidas y los puntos de origen y destino están predeterminados, los requerimientos operativos podrían resolverse mediante un control más convencional. Además, este enfoque inicial permite simplificar el proceso de implementación y reducir los costos asociados a la tecnología avanzada de gestión de tráfico aéreo.

La gestión inicial podría apoyarse en un equipo operativo reducido compuesto por personal especializado en el control de las rutas y las operaciones en los vertipuertos. Este equipo estaría respaldado por una inversión inicial en sistemas de monitorización básica y software de gestión que permita supervisar los vuelos y resolver cualquier contingencia. Estos sistemas no requieren un nivel de automatización extremo en esta fase, pero sí garantizar la coordinación eficiente entre los 22 eVTOLs y los operadores terrestres.

En cuanto a la infraestructura tecnológica, se plantean centros de control en los vertipuertos principales, equipados con herramientas digitales para la planificación y seguimiento de los vuelos. Estas herramientas permitirían a los empleados manejar las operaciones diarias, optimizar el uso de las aeronaves y gestionar posibles incidencias en tiempo real. Adicionalmente, la formación del personal jugará un papel crucial para garantizar que las operaciones se realicen de manera fluida y segura.

A medida que se incremente la actividad y se expanda la red de rutas, se podría considerar la integración de sistemas U-Space para manejar operaciones más complejas. Cabe destacar que existen ya múltiples proyectos en curso que han desarrollado sistemas U-Space funcionales, los cuales han sido probados con éxito en diversas ciudades. Estas experiencias previas ofrecen una base tecnológica y operativa sólida para la futura expansión y sofisticación del sistema de gestión.

Por otro lado, la naturaleza modular y escalable del modelo propuesto permite adaptarse progresivamente a estas tecnologías más avanzadas, garantizando siempre que la seguridad y la eficiencia de las operaciones se mantengan como prioridades esenciales. Esta estrategia asegura que el modelo no solo es viable a corto plazo, sino también sostenible y adaptable a largo plazo en un contexto de crecimiento continuo del tráfico aéreo urbano.

7.3 Integración con Infraestructuras Tecnológicas y de Energía

La integración de las infraestructuras tecnológicas y energéticas es un pilar fundamental para garantizar la operatividad eficiente y sostenible del sistema de movilidad aérea urbana propuesto. Dado el diseño del modelo, que incluye una red de vertipuertos y 22 eVTOLs operando en rutas predefinidas, esta integración debe centrarse en cubrir las necesidades actuales y prever un escalado que soporte el crecimiento futuro.

7.3.1 Infraestructuras Tecnológicas

Cada vertipuerto contará con sistemas tecnológicos esenciales para la gestión de operaciones. Estos sistemas incluyen:

- **Centros de Control Localizados:** Equipados con hardware y software para la monitorización en tiempo real de los vuelos y la gestión de operaciones terrestres. Este equipamiento será el núcleo de la gestión local y deberá estar conectado a una red centralizada para coordinar las operaciones entre vertipuertos.
- **Red de Comunicación Segura:** Utilizando redes de fibra óptica y conexiones redundantes, se asegurará la transmisión fiable de datos críticos entre los vertipuertos y los centros de control.
- **Sistemas de Reservas y Gestión de Rutas:** Herramientas digitales para planificar rutas, asignar aeronaves y optimizar los horarios de operación, minimizando tiempos de espera y maximizando la eficiencia operativa.
- **Automatización Progresiva:** En una primera fase, los sistemas serán semiautomatizados, permitiendo la gestión directa por parte del personal. Sin embargo, la infraestructura estará preparada para integrar capacidades más avanzadas de automatización y gestión autónoma conforme aumente la complejidad operativa.

7.3.2 Infraestructuras Energéticas

La operatividad de los eVTOLs depende de una infraestructura energética robusta y eficiente. Se han considerado las siguientes soluciones:

- **Estaciones de Battery Swapping:** En lugar de depender exclusivamente de la carga de baterías in situ, cada vertipuerto estará equipado con estaciones de intercambio rápido de baterías. Este sistema permite sustituir baterías agotadas por otras completamente cargadas pocos minutos, garantizando tiempos de rotación mínimos y una alta disponibilidad de las aeronaves.
- **Gestión Centralizada de Energía:** Un sistema de monitorización permitirá gestionar el suministro y la demanda energética de manera eficiente, asegurando que las estaciones de intercambio dispongan siempre de un stock suficiente de baterías cargadas.

- **Dependencia de la Red Eléctrica:** Debido al alto consumo energético proyectado, se optará por conexiones estables a la red eléctrica en lugar de sistemas de generación local como paneles solares, cuya capacidad no cubriría la demanda. No obstante, se mantendrá abierta la posibilidad de incorporar energías renovables en fases futuras si se desarrollan soluciones tecnológicas más avanzadas.
- **Redundancia Energética:** Se instalarán sistemas de respaldo, como generadores de emergencia, para asegurar la continuidad de las operaciones ante posibles fallos en el suministro eléctrico.

7.3.3 Planificación del Personal y Costos Asociados

La integración de estas infraestructuras requiere un equipo técnico cualificado para su instalación, operación y mantenimiento. En la fase inicial, el personal se centrará en la gestión directa de los sistemas tecnológicos y energéticos, así como en la resolución de incidencias. Con el tiempo, la introducción de tecnologías más avanzadas reducirá la carga operativa directa del personal.

El coste inicial para la instalación de estas infraestructuras ya ha sido estimado dentro de los apartados de "Sistemas Tecnológicos" y "Construcción de Infraestructura", ajustando las inversiones según las necesidades específicas de cada vertipuerto. A nivel operativo, los costes de mantenimiento y actualización de estos sistemas se incluirán en los presupuestos anuales de operación.

7.3.4 Escalabilidad y Adaptación Futura

El diseño modular del modelo permite una escalabilidad progresiva. A medida que aumente el volumen de operaciones, los sistemas tecnológicos podrán adaptarse para incorporar funcionalidades avanzadas como:

- **Implementación de U-Space:** Aunque no es imprescindible en la fase inicial, la infraestructura tecnológica estará preparada para integrar herramientas U-Space a medida que se complejicen las operaciones.
- **Gestión Energética Sostenible:** En el futuro, se podrán considerar fuentes de energía renovable de mayor escala, como instalaciones de hidrógeno o redes inteligentes con almacenamiento local.

8 Plan de Implementación y Escalabilidad

Para garantizar el éxito del modelo de negocio de movilidad aérea urbana en Madrid, se ha diseñado un plan de implementación en fases, con un enfoque gradual y sostenible que permita gestionar eficientemente los recursos, adaptarse a los desafíos del entorno y maximizar las oportunidades de crecimiento. La planificación considera las condiciones locales y las tendencias globales, incorporando indicadores clave de rendimiento para evaluar el éxito en cada etapa.

8.1 Fases del Proyecto

8.1.1 Fase 1: Estudio de Viabilidad y Preparación (Año 1)

El objetivo principal de esta fase es sentar las bases del proyecto mediante la validación técnica, económica y normativa, garantizando el respaldo institucional y la viabilidad del modelo.

En esta etapa, se llevarán a cabo estudios de impacto económico, social y medioambiental para asegurar el apoyo de las instituciones locales y nacionales. Asimismo, se realizará una revisión normativa exhaustiva para cumplir con los requisitos de la AESA, con especial atención a la integración de U-Space y la certificación de los eVTOLs.

Se definirán y aprobarán las ubicaciones estratégicas de los vertipuertos considerando su contribución a la intermodalidad de la ciudad. Paralelamente, se iniciará la búsqueda de alianzas público-privadas que permitan asegurar la financiación de la fase inicial.

8.1.1.1 Acciones principales

- Realización de estudios de impacto económico, social y ambiental.
- Revisión normativa para garantizar el cumplimiento con AESA y U-Space.
- Definición y aprobación de las ubicaciones de vertipuertos.
- Identificación de socios estratégicos para la financiación inicial.

8.1.1.2 Resultados esperados

- Autorizaciones regulatorias preliminares obtenidas.
- Contratos firmados con fabricantes de eVTOLs y empresas constructoras.
- Presupuesto detallado y plan de inversión aprobado.

8.1.2 Fase 2: Construcción de Infraestructura y Adquisición de eVTOLs (Años 2-3)

Esta fase marca el inicio de la materialización del proyecto mediante la construcción de los vertipuertos y la adquisición de la flota inicial de aeronaves.

Se priorizará la construcción de los seis vertipuertos propuestos, comenzando por aquellos con mayor impacto estratégico, como el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas y la Torre Picasso. Cada vertipuerto contará con sistemas básicos de gestión, seguridad y comunicación. La flota inicial estará compuesta por 22 eVTOLs con sistemas de battery swapping operativos, garantizando la eficiencia en la recarga.

8.1.2.1 Acciones principales

- Construcción de los seis vertipuertos, priorizando los más estratégicos.
- Instalación de sistemas de gestión y seguridad.

- Adquisición de la flota inicial de eVTOLs y sus sistemas de recarga.
- Formación del personal operativo para roles clave.

8.1.2.2 Resultados esperados

- Infraestructura operativa en al menos tres vertipuertos clave.
- Flota inicial certificada y lista para operaciones.
- Personal capacitado y sistemas operativos básicos instalados.

8.1.3 Fase 3: Lanzamiento y Operación Inicial (Años 4-5)

Esta etapa marca el inicio de las operaciones comerciales, con un enfoque en optimizar la ocupación y demostrar la viabilidad operativa.

Las rutas clave RP01 (Aeropuerto ↔ Torre Picasso) y RP02 (Aeropuerto ↔ Estación de Atocha) serán las primeras en operar. Se implementarán estrategias de marketing para posicionar el servicio destacando su rapidez y exclusividad. El monitoreo continuo permitirá ajustar frecuencias, tarifas y servicios de acuerdo con la demanda real.

8.1.3.1 Acciones principales

- Puesta en marcha de las rutas clave RP01 y RP02.
- Estrategias de marketing y captación de clientes.
- Implementación de sistemas de monitoreo y ajustes operativos.

8.1.3.2 Resultados esperados

- Ocupación inicial del 50% en todas las rutas, con incrementos anuales del 10%.
- Evaluaciones trimestrales para identificar mejoras en la operativa.

8.1.4 Fase 4: Escalabilidad y Consolidación (Años 6-10)

Esta fase se centra en alcanzar el 100% de ocupación en todas las rutas operativas y expandir la red mediante la incorporación de nuevas tecnologías y optimización de recursos.

Las rutas existentes se consolidarán mediante la incorporación de vertipuertos secundarios si la demanda lo requiere. La migración progresiva hacia eVTOLs autónomos reducirá los costes operativos y aumentará la capacidad de carga. Asimismo, se explorarán nuevas fuentes de ingresos, como el leasing de vertipuertos a operadores de helicópteros u otros fabricantes, a cambio de descuentos en la adquisición de aeronaves o participación en beneficios.

Además, se implementarán estrategias de ingresos complementarios mediante colaboraciones publicitarias y convenios con empresas logísticas y turísticas. La consolidación del modelo posicionará a Madrid como referencia internacional en movilidad aérea urbana.

8.1.4.1 Acciones principales

- Expansión de la red con vertipuertos secundarios.
- Implementación de eVTOLs autónomos y sistemas avanzados de gestión de tráfico aéreo.
- Ajuste de la flota y adquisición de más aeronaves según la demanda.
- Introducción de nuevas fuentes de ingresos como leasing de vertipuertos y acuerdos publicitarios, incluso antes de esta fase si es viable.

8.1.4.2 Resultados esperados

- Ocupación del 100% en todas las rutas clave (o, en su defecto, ingresos equivalentes a lo que en este modelo se ha considerado como el 100% de la ocupación).
- Reducción de costes operativos con aeronaves autónomas.
- Consolidación del modelo como referencia internacional de UAM.

8.1.5 Fase 5: Expansión y Diversificación (Años 10+)

Esta última fase se enfoca en la expansión del modelo hacia nuevas oportunidades de rutas, tecnologías y mercados.

Se incorporarán nuevas rutas estratégicas según las demandas emergentes y se explorará la expansión del modelo a otras ciudades interesadas en implementar UAM. La automatización de la operación será clave, integrando tecnologías avanzadas de gestión del tráfico aéreo y soluciones autónomas más eficientes.

Se considerará la introducción de drones de carga más pequeños para optimizar rutas logísticas específicas, aprovechando plenamente las capacidades del espacio aéreo gestionado mediante U-Space. La innovación continua y la diversificación de servicios permitirán mantener el liderazgo en el sector y garantizar la sostenibilidad del modelo a largo plazo.

Además, se evaluará la instalación de paneles solares en ubicaciones periféricas a la ciudad de Madrid para abastecer la red de vertipuertos, así como la adquisición de energía procedente exclusivamente de fuentes limpias. El objetivo es alcanzar un balance de emisiones cero y reforzar la imagen del proyecto como una solución sostenible, destacando no solo la reducción de emisiones contaminantes, sino también el impacto positivo en la disminución de enfermedades y muertes asociadas a la contaminación urbana.

8.1.5.1 Acciones principales

- Incorporación de nuevas rutas basadas en oportunidades emergentes.
- Expansión del modelo a otras ciudades.
- Automatización total de la operación mediante tecnologías avanzadas.
- Integración de drones de carga pequeños para optimización logística.
- Instalación de paneles solares fuera de la ciudad y contratación de energía 100% limpia para abastecer los vertipuertos.

8.1.5.2 Resultados esperados:

- Expansión exitosa a otras ciudades nacionales e internacionales.
- Mayor eficiencia operativa gracias a la automatización.
- Innovación constante en el modelo con tecnologías emergentes.
- Reducción de emisiones y fortalecimiento de la imagen del proyecto como referente de sostenibilidad.

8.2 Estrategias para Escalabilidad y Expansión

El éxito inicial del proyecto debe capitalizarse con estrategias diseñadas para escalar el modelo de negocio y expandir las operaciones tanto geográficamente como en términos de servicios.

Estas estrategias se enfocan en maximizar la eficiencia operativa, aprovechar las economías de escala y diversificar las fuentes de ingresos para consolidar la viabilidad económica del sistema.

8.2.1 Expansión Geográfica

La expansión geográfica tiene como objetivo replicar el modelo en ciudades estratégicas que compartan características demográficas y de movilidad similares a las de Madrid. Este crecimiento fortalecerá la presencia del sistema en España y Europa, posicionando al modelo como una referencia de movilidad urbana eficiente.

En el ámbito nacional, se priorizarán ciudades como Barcelona, Valencia, Málaga y Sevilla, debido a su densidad poblacional, atractivo turístico y necesidad de conexiones intermodales. En estos casos, la cercanía a hubs de transporte, como aeropuertos y estaciones de tren, será un factor decisivo para definir las ubicaciones de los vertipuertos.

A nivel internacional, ciudades como París, Londres y Múnich representan candidatas clave, ya que cuentan con un marco favorable para la movilidad aérea urbana y han sido protagonistas en proyectos piloto de UAM. La estrategia de internacionalización incluirá el estudio de regulaciones locales y la colaboración con gobiernos y organismos internacionales para cumplir con las normativas específicas de cada país.

El enfoque "hub-and-spoke" será la base de esta expansión, priorizando la creación de grandes hubs que conecten con destinos secundarios estratégicos, como complejos logísticos, hospitales y zonas de alta densidad empresarial. Esta estrategia permitirá gestionar de manera eficiente la demanda, maximizando el uso de recursos y garantizando la interconectividad entre rutas clave.

Resumen de puntos clave:

- Expansión nacional en Barcelona, Valencia, Málaga y Sevilla.
- Internacionalización en París, Londres y Múnich.
- Enfoque "hub-and-spoke" para optimizar conexiones entre grandes núcleos y destinos secundarios.

8.2.2 Ampliación de la Red de Rutas y Vertipuertos

El aumento y/u optimización de la demanda requerirá la ampliación de la red de rutas y vertipuertos para atender nuevos segmentos de mercado y áreas con alta densidad poblacional o actividad económica.

Se identificarán rutas adicionales dentro de Madrid y otras ciudades para cubrir destinos clave no considerados en la fase inicial, como conexiones entre áreas metropolitanas periféricas y el centro urbano. Este tipo de rutas permitirá reducir la congestión en las vías terrestres y ofrecer alternativas más rápidas y sostenibles.

La infraestructura también se adaptará mediante el diseño de vertipuertos modulares. Este enfoque permitirá que los vertipuertos puedan ampliarse o modificarse según las necesidades operativas, facilitando su reconversión para distintos tipos de servicios, como transporte de pasajeros, carga urgente y emergencias médicas, con inversiones incrementales y controladas.

Resumen de puntos clave:

- Nuevas rutas entre áreas periféricas y el centro de las ciudades.
- Vertipuertos modulares adaptados para pasajeros, carga y emergencias.
- Adaptabilidad de la infraestructura con inversiones escalonadas.

8.2.3 Incorporación de Nuevas Tecnologías

El uso de tecnologías avanzadas será esencial para mantener la eficiencia y la seguridad a medida que aumente el volumen de operaciones. Esta estrategia está estrechamente vinculada al apartado 7. Consideraciones Tecnológicas y de Innovación, donde se detallan diversas herramientas y avances aplicables al proyecto.

La implementación progresiva de sistemas de gestión de tráfico aéreo U-Space permitirá coordinar de manera fluida un mayor número de aeronaves y gestionar el espacio aéreo compartido con otras operaciones urbanas. Esta tecnología reducirá los riesgos operativos y garantizará la integración de los vuelos con otros sistemas de transporte.

Asimismo, la incorporación de eVTOLs autónomos será un paso crucial para aumentar la frecuencia de los vuelos y reducir los costes operativos al eliminar la necesidad de pilotos humanos. En este contexto, se considera la posibilidad de integrar aeronaves con propulsión híbrida o con sistemas de recarga ultrarrápida para mejorar los tiempos de respuesta y ampliar las capacidades de vuelo.

El proyecto también contempla la adopción de soluciones de automatización avanzada y mejoras en los sistemas de mantenimiento predictivo mediante el uso de inteligencia artificial. Esto permitirá predecir posibles fallos técnicos y programar tareas de mantenimiento de manera más eficiente, evitando interrupciones en el servicio.

Resumen de puntos clave:

- Implementación de sistemas U-Space para la gestión de tráfico aéreo.
- Migración a eVTOLs autónomos para reducir costes y aumentar la frecuencia de vuelos.
- Uso de inteligencia artificial para mantenimiento predictivo.

8.2.4 Diversificación de Servicios

La diversificación de servicios tiene como objetivo ampliar las fuentes de ingresos y atraer a nuevos segmentos de clientes. Además de los servicios de transporte actuales, se ofrecerán nuevas experiencias personalizadas para generar ingresos adicionales y fortalecer la propuesta de valor.

La publicidad en vertipuertos y aeronaves abrirá oportunidades para colaboraciones con marcas premium, ofreciendo espacios promocionales atractivos. Por otro lado, se potenciarán los vuelos turísticos con recorridos temáticos y exclusivos, como rutas nocturnas sobre la ciudad o experiencias durante eventos especiales.

Se explorarán colaboraciones con empresas de sectores específicos, como la logística y la atención médica, para ofrecer servicios dedicados y personalizados. Esto incluye el transporte

urgente de productos perecederos y órganos para trasplantes, lo que reforzará la imagen del sistema como un aliado clave en situaciones críticas.

Resumen de puntos clave:

- Espacios publicitarios en vertipuertos y aeronaves para generar ingresos adicionales.
- Vuelos temáticos y recorridos turísticos personalizados.
- Colaboraciones con empresas para servicios de transporte especializados.

8.2.5 Estrategias Financieras

La expansión del modelo requerirá un respaldo financiero sólido que permita mantener un crecimiento sostenible y abordar los retos asociados a la implementación de nuevas rutas y tecnologías. Se utilizarán estrategias de financiación adaptadas a cada fase de crecimiento, aprovechando recursos públicos y privados.

Las alianzas público-privadas serán clave para compartir riesgos y reducir la carga financiera inicial. En este sentido, los acuerdos con administraciones locales facilitarán el acceso a recursos e infraestructuras ya existentes. Además, se recurrirá a bonos verdes y créditos europeos diseñados para fomentar la sostenibilidad y la innovación tecnológica, lo que permitirá obtener financiación con condiciones favorables.

Por último, la reinversión de ingresos generados durante las primeras fases del proyecto permitirá financiar la expansión de infraestructuras y flotas sin comprometer la estabilidad económica del sistema. Esta estrategia fortalecerá la autosuficiencia del modelo y reducirá la dependencia de financiación externa.

Resumen de puntos clave:

- Alianzas público-privadas para compartir riesgos e inversiones.
- Uso de bonos verdes y créditos europeos para proyectos sostenibles.
- Reinversión de beneficios para financiar la expansión de manera autosuficiente.

8.3 Indicadores de Éxito y Medición de Resultados

El éxito del modelo de negocio se medirá mediante indicadores clave que permitan evaluar tanto el rendimiento operativo como la sostenibilidad económica y social. Estos indicadores se estructuran en tres áreas principales: **operativa, financiera y social/ambiental**.

8.3.1 Indicadores Operativos

Estos indicadores medirán la eficiencia del sistema y la calidad del servicio ofrecido:

1. **Tasa de ocupación promedio por ruta:** Porcentaje de capacidad utilizada en vuelos, desglosado por rutas y franjas horarias.
 - **Meta:** Incrementar del 50% en el primer año al 90-100% en el quinto año.
2. **Puntualidad de operaciones:** Porcentaje de vuelos que operan dentro del margen de tiempo planificado (<5 minutos de retraso).
 - **Meta:** Mantener una puntualidad superior al 95%.

3. **Frecuencia operativa:** Número de vuelos diarios realizados en relación con la capacidad máxima de la flota.
 - **Meta:** Alcanzar un 85% de frecuencia operativa en todas las rutas clave.

8.3.2 Indicadores Financieros

Evalúan la sostenibilidad económica y el retorno de la inversión:

1. **Ingresos operativos anuales por ruta:** Comparación de los ingresos proyectados con los reales para ajustar tarifas y estrategias de marketing.
 - **Meta:** Superar los ingresos proyectados en un 10% al quinto año.
2. **Margen operativo:** Relación entre ingresos operativos y costes operativos totales.
 - **Meta:** Alcanzar un margen operativo del 30-35% a partir del tercer año.
3. **Retorno sobre la inversión (ROI):** Tiempo necesario para recuperar la inversión inicial, ajustado a las proyecciones financieras.
 - **Meta:** Lograr el 100% del ROI en 4-5 años.

8.3.3 Indicadores Sociales y Ambientales

Monitorean el impacto del modelo en la comunidad y el medio ambiente:

1. **Reducción de tiempo de viaje:** Comparación entre tiempos de viaje con eVTOLs y medios tradicionales para demostrar el valor añadido.
 - **Meta:** Reducción promedio del 50% en el tiempo de viaje en las rutas operativas.
2. **Satisfacción del cliente:** Evaluada a través de encuestas regulares a usuarios.
 - **Meta:** Obtener un índice de satisfacción superior al 90%.
3. **Reducción de emisiones de CO₂:** Cantidad de emisiones evitadas al reemplazar vehículos terrestres por eVTOLs eléctricos.
 - **Meta:** Evitar un número razonable de toneladas de emisiones de CO₂ anuales al alcanzar la ocupación máxima en las rutas. Hacer un pequeño estudio comparativo de las muertes y enfermedades cardiovasculares evitadas en la ciudad de Madrid gracias a la disminución de las emisiones derivadas de la combustión.

8.3.4 Sistema de Seguimiento y Evaluación

Para garantizar el cumplimiento de estos indicadores:

- **Revisión trimestral:** Análisis de datos operativos, financieros y sociales para detectar desviaciones.
- **Panel de control centralizado:** Un sistema digitalizado que compile datos en tiempo real para facilitar la toma de decisiones.
- **Auditorías externas:** Evaluaciones anuales por terceros para validar la precisión de los informes y reforzar la transparencia ante inversores y stakeholders.

9 Conclusiones y Recomendaciones

9.1 Resumen de Hallazgos Clave

El análisis del modelo de negocio de Movilidad Aérea Urbana (UAM) en Madrid ha demostrado resultados notablemente prometedores en todos los escenarios evaluados. Los datos obtenidos reflejan que, incluso bajo suposiciones conservadoras y aplicando restricciones significativas tanto en ingresos como en operación, el proyecto mantiene una rentabilidad sólida. Esto posiciona al modelo como una oportunidad única para transformar la movilidad urbana de manera sostenible y eficiente.

Uno de los hallazgos más relevantes es que el proyecto muestra resultados positivos incluso en el escenario pesimista, con un flujo de caja acumulado al décimo año considerablemente favorable en los escenarios optimista y baseline. Esto evidencia la robustez financiera del modelo incluso en condiciones adversas. En el escenario optimista, el Valor Actual Neto (VAN) se sitúa en 386,5 millones de euros, con una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 72,88% y un Retorno sobre la Inversión (ROI) del 839,79%.

Se ha aplicado un enfoque de "stress test" financiero para evaluar la resistencia del modelo, introduciendo hipótesis operativas poco realistas que generan una carga máxima en términos de costes y una reducción significativa en los ingresos esperados. Por ejemplo, se han simulado altos niveles de vuelos vacíos, ocupaciones reducidas y frecuencias elevadas, lo que incrementa los gastos asociados al mantenimiento, consumo de energía y personal. Este ejercicio permite demostrar que, aunque la operativa resultante sería poco sostenible en la realidad, el modelo sigue siendo rentable, lo que refuerza la solidez del business case.

Además, se ha identificado que el principal desafío no es la viabilidad técnica ni la rentabilidad económica, sino las barreras regulatorias y la necesidad de coordinar operaciones en zonas restringidas, como el espacio aéreo del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. La adopción de medidas regulatorias, la obtención de permisos y la coordinación con autoridades de aviación civil y otros organismos serán factores clave para asegurar el éxito del proyecto. La regulación del U-Space será un elemento fundamental para gestionar de manera eficiente el tráfico aéreo urbano y garantizar la seguridad.

Hallazgos clave:

- El proyecto es rentable incluso en escenarios adversos.
- El enfoque conservador demuestra la resiliencia del modelo mediante un "stress test" financiero.
- La principal barrera identificada es la regulatoria y la necesidad de financiación inicial.
- La coordinación con las autoridades aeroportuarias es imprescindible para el éxito.

9.2 Viabilidad y Potencial del Modelo de Negocio

El análisis de la viabilidad económica y operativa del modelo de negocio confirma que la implementación de una red de vertipuertos y rutas de eVTOLs es una propuesta viable y con un alto potencial de crecimiento. La UAM tiene el potencial de revolucionar el transporte urbano

mediante la reducción de tiempos de desplazamiento, la descongestión de las vías terrestres y la disminución de emisiones contaminantes.

Desde la perspectiva financiera, el modelo presenta indicadores altamente positivos. En el escenario optimista, los ingresos acumulados a lo largo de diez años superan con creces las inversiones iniciales y los costes operativos. Este resultado se logra incluso con una proyección de tarifas accesibles y una estructura de costes diseñada para maximizar la eficiencia operativa. Asimismo, el uso de aeronaves autónomas en fases avanzadas permitirá reducir aún más los costes operativos al prescindir de pilotos humanos, aumentando la rentabilidad y la capacidad de escalabilidad.

En cuanto al aspecto operativo, el proyecto propone un sistema modular y escalable con vertipuertos capaces de adaptarse a distintos tipos de servicios (pasajeros, carga y emergencias médicas). Esta flexibilidad permite ajustar la oferta según la demanda y maximizar el uso de recursos. Además, la infraestructura modular facilita la expansión a otras ciudades y regiones.

Otro punto a destacar es la diversificación de las fuentes de ingresos, que incluye rutas de pasajeros, transporte de carga urgente, servicios médicos y recorridos turísticos. Esta estrategia contribuye a aumentar la resiliencia del modelo frente a cambios en la demanda de un segmento específico.

Aspectos clave de la viabilidad del modelo:

- Indicadores financieros sólidos, incluso bajo escenarios conservadores y/o pesimistas.
- Ahorro significativo en costes operativos gracias a la incorporación de eVTOLs autónomos.
- Infraestructura modular y escalable para responder a variaciones en la demanda.
- Diversificación de servicios que fortalece la rentabilidad y la resiliencia del modelo.

A pesar de los resultados positivos, la implementación del proyecto requiere superar una serie de retos. La regulación de la movilidad aérea urbana aún está en desarrollo, lo que implica la necesidad de colaborar estrechamente con organismos regulatorios, como la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), para definir procedimientos seguros y eficientes. También será fundamental garantizar la aceptación pública mediante campañas informativas y demostraciones que muestren la seguridad y los beneficios del sistema.

La disponibilidad de financiación es otro aspecto crítico. Si bien el proyecto es financieramente atractivo, será necesario explorar diversas fuentes de inversión, como concesiones operativas, joint ventures, créditos europeos y bonos verdes. La sólida proyección de ingresos y los altos índices de rentabilidad serán argumentos clave para atraer inversores públicos y privados.

Recomendaciones para maximizar la viabilidad y rentabilidad económica y evitar contratiempos:

- Priorizar las gestiones regulatorias con las autoridades de aviación civil.
- Establecer alianzas estratégicas con operadores de transporte y entidades públicas.
- Implementar proyectos piloto para validar la operativa en entornos controlados.
- Desarrollar campañas de sensibilización para fomentar la aceptación pública.

- Diversificar las fuentes de financiación para reducir riesgos.

9.3 Recomendaciones para Futuras Investigaciones o Proyectos Piloto

El desarrollo inicial de este modelo de negocio representa solo el comienzo del potencial transformador que la movilidad aérea urbana puede tener en las ciudades. Para maximizar este impacto, futuras investigaciones y proyectos piloto deberían explorar áreas clave que permitan afinar el modelo, aprovechar nuevas tecnologías y abrir vías adicionales de ingresos. A continuación, se presentan recomendaciones específicas:

9.3.1 Actualización Constante del Estado del Arte

Es clave que futuros estudios mantengan una actualización constante con respecto a los avances tecnológicos y económicos relacionados con los eVTOLs y sus infraestructuras asociadas. Se sugiere:

- **Evaluación de eVTOLs avanzados:** Incorporar modelos de aeronaves con mejores capacidades, como mayor autonomía, mayor capacidad de carga y menor coste operativo, para mejorar la viabilidad económica.
- **Integración de nuevas tecnologías:** Explorar sistemas de gestión de tráfico aéreo autónomos, baterías de mayor eficiencia energética y capacidades de recarga más rápidas.

9.3.2 Análisis de Ingresos Derivados

Futuros estudios deberían profundizar en ingresos complementarios al transporte directo, tales como:

- **Publicidad y marketing:** Maximizar los ingresos mediante campañas de marcas en vertipuertos y eVTOLs, incluyendo acuerdos exclusivos con empresas tecnológicas o turísticas.
- **Alquiler de infraestructuras:** Ofrecer vertipuertos para operaciones de helicópteros, vuelos privados o incluso para alquilar a otras redes de vertipuertos.
- **Experiencias premium:** Diseñar paquetes turísticos exclusivos en los eVTOLs, como rutas temáticas o gourmet en el aire.

9.3.3 Expansión de la Red de Vertipuertos y Rutas

La expansión geográfica y funcional de la red debe ser una prioridad para próximas investigaciones, con el objetivo de cubrir nuevas demandas y maximizar el alcance del modelo:

- **Vertipuertos adicionales:** Evaluar ubicaciones estratégicas, especialmente en áreas rurales o zonas metropolitanas de alta densidad, que no fueron incluidas en la fase inicial.
- **Rutas de emergencia hospitalaria:** Establecer un sistema de transporte prioritario para hospitales, que incluya el transporte de pacientes, órganos y medicamentos a zonas rurales o de difícil acceso, complementando la red de transporte existente.

9.3.4 Análisis Socioeconómico y Ambiental

Es fundamental medir el impacto social y ambiental para asegurar la aceptación pública y el cumplimiento de objetivos de sostenibilidad:

- **Evaluación del impacto ambiental:** Determinar los beneficios reales en términos de reducción de emisiones de CO₂ en comparación con alternativas terrestres.
- **Estudios de aceptación pública:** Analizar cómo perciben los ciudadanos las operaciones de los eVTOLs, incluyendo aspectos de ruido, accesibilidad y tarifas.
- **Análisis económico ampliado:** Incluir proyecciones más precisas sobre el impacto en el empleo, tanto en la construcción como en la operación de vertipuertos y rutas.

9.3.5 Innovación en Rutas Emergentes

Los proyectos piloto futuros deberían incorporar rutas con aplicaciones específicas no contempladas en el modelo inicial:

- **Rutas rurales:** Diseñar sistemas que conecten áreas rurales con hospitales urbanos, aeropuertos o centros logísticos, contribuyendo al desarrollo regional.
- **Vuelos on-demand:** Evaluar la viabilidad de un modelo de rutas flexibles que operen bajo demanda, optimizando la ocupación y reduciendo tiempos de espera.

9.3.6 Financiamiento y Colaboraciones

Se deben explorar modelos financieros innovadores y colaboraciones público-privadas que potencien la implementación de futuras fases:

- **Nuevos esquemas de financiamiento:** Aprovechar instrumentos como bonos verdes, fondos de innovación europeos y co-inversiones público-privadas.
- **Colaboraciones estratégicas:** Asociarse con empresas tecnológicas y turísticas para financiar vertipuertos adicionales o eVTOLs especializados.

9.3.7 Rutas de carga con drones especializados

Se podría explorar la utilización de drones más pequeños y eficientes para cargas más pequeñas como servicio logístico. La implementación en Madrid de un enjambre de este tipo podría ser interesante de cara a ver su viabilidad e ingresos/costes asociados. Sus complejidades radicarían en la gestión aérea de dichos drones, al ser una cantidad mucho mayor de la planteada en este modelo, que no requiere de software específico de UTM / U-Space

9.3.8 Desarrollo técnico de “vertipacks”

El desarrollo técnico de cómo se podrían implementar los vertipacks podría reducir enormemente los costes no recurrentes del diseño, planificación y construcción de los vertipuertos sobre superficies similares como techos, parkings al aire libre...etc, lo que disminuiría mucho esos enormes costes iniciales derivados de este concepto.

Estas recomendaciones proporcionan un marco para el avance continuo del modelo de movilidad aérea urbana, asegurando que evolucione de acuerdo con las demandas del mercado, las capacidades tecnológicas emergentes y los requerimientos sociales y ambientales. A medida

que se implementen estas mejoras, se podrá consolidar la viabilidad económica, operativa y social del sistema.

9.4 Limitaciones del Estudio

Aunque este estudio ha sido diseñado para proporcionar una visión integral y viable del modelo de movilidad aérea urbana basado en vertipuertos y eVTOLs, es importante reconocer ciertas limitaciones que podrían afectar tanto los resultados como su aplicabilidad a largo plazo. Estas limitaciones se agrupan en aspectos tecnológicos, económicos, operativos, sociales y relacionados con los datos.

9.4.1 Limitaciones Tecnológicas

Este apartado analiza los desafíos técnicos que podrían influir en la implementación del proyecto y en su viabilidad a largo plazo:

- **Capacidades actuales de los eVTOLs:** La tecnología de eVTOLs aún se encuentra en desarrollo, lo que implica incertidumbre sobre su rendimiento real en términos de autonomía, capacidad de carga y costes operativos.
- **Infraestructura tecnológica limitada:** Aunque se han considerado sistemas avanzados como el U-Space para la gestión del tráfico aéreo urbano, su efectividad depende de una infraestructura que aún no está completamente disponible.
- **Falta de estandarización:** La ausencia de normativas globales y estándares unificados para las operaciones de eVTOLs podría generar incompatibilidades regulatorias y operativas entre regiones.

9.4.2 Limitaciones Económicas

Este apartado detalla las restricciones financieras y su impacto en la ejecución del modelo de negocio:

- **Escenarios financieros conservadores:** Aunque se han utilizado hipótesis conservadoras para minimizar riesgos, la realidad del mercado podría desviarse de las proyecciones, especialmente en términos de demanda.
- **Dependencia de incentivos:** La viabilidad inicial del proyecto depende de la disponibilidad de subvenciones, bonos verdes y modelos de financiación público-privada, los cuales están sujetos a cambios políticos y económicos.
- **Costes iniciales elevados:** La inversión necesaria para construir vertipuertos y adquirir la flota de eVTOLs puede ser prohibitiva en ciertas regiones, lo que podría limitar la replicabilidad del modelo.

9.4.3 Limitaciones Operativas

Este apartado aborda los desafíos operativos relacionados con la gestión y el rendimiento del sistema:

- **Demanda incierta:** Las proyecciones de ocupación y uso de rutas se han basado en datos actuales y referencias de otros sectores, pero el comportamiento real del mercado puede variar debido a factores externos como la competencia y la percepción pública.

- **Operativa intensiva y poco realista:** El modelo ha sido diseñado para un "stress test" financiero, implementando una operativa frenética con vuelos frecuentes y altos niveles de consumo de recursos. Esto ha incrementado los costes al añadir horas de vuelo, mantenimiento y personal. Aunque este enfoque distorsiona la operativa real, busca evaluar la resiliencia financiera del modelo en condiciones adversas. En un entorno operativo real, se podrían optimizar las frecuencias, reducir la flota activa y ajustar los horarios para mejorar la ocupación y disminuir los costes.
- **Gestión de rutas y operaciones:** La viabilidad del modelo depende de una planificación operativa eficiente que contemple la gestión del tráfico aéreo, los tiempos de espera y los mantenimientos programados. La complejidad de estos elementos podría ser mayor de la anticipada.
- **Capacidad de adaptación:** El modelo actual ha sido diseñado para un conjunto específico de rutas y vertipuertos, lo que podría limitar su flexibilidad ante cambios imprevistos en la demanda o el entorno operativo.

9.4.4 Limitaciones Sociales y Ambientales

Este apartado describe los posibles retos relacionados con la aceptación pública y los impactos ambientales:

- **Aceptación pública:** La percepción ciudadana sobre el impacto acústico, la seguridad y la equidad en el acceso a los servicios de eVTOLs podría influir en la aceptación del modelo.
- **Impacto ambiental indirecto:** Aunque el proyecto propone una reducción de emisiones frente al transporte terrestre, la dependencia de la red eléctrica y la fabricación de baterías genera huellas de carbono que aún no se han cuantificado exhaustivamente.
- **Equidad en la accesibilidad:** Dado que inicialmente el modelo está orientado a clientes con un alto poder adquisitivo, podría limitarse su aceptación general y generar tensiones sociales.

9.4.5 Limitaciones de Datos

Este apartado señala las restricciones relacionadas con la información disponible y su impacto en la precisión de las proyecciones:

- **Datos de referencia limitados:** Muchas estimaciones se han basado en información de proyectos piloto y estudios previos, los cuales no siempre reflejan el contexto operativo final del sistema.
- **Suposiciones simplificadas:** El análisis económico y operativo se ha realizado utilizando escenarios simplificados, lo que podría omitir factores complejos que influyan en la viabilidad real.
- **Falta de datos longitudinales:** Al tratarse de un modelo innovador, no existen datos históricos sobre su desempeño a largo plazo que permitan validar con certeza las proyecciones realizadas.

10 Referencias y Bibliografía

A continuación, se muestran todas las referencias a textos y páginas web utilizadas a lo largo del TFM:

Ref.	Fuente	Descripción
[R1]	https://www.un.org/es/desa/2018-world-urbanization-prospects	Naciones Unidas (ONU): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.
[R2]	https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/the-road-to-seamless-urban-mobility/es-ES	McKinsey Global Institute: Urban World: The Global Consumers to Watch.
[R3]	https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/european-aviation-environmental-report-2022	Relevancia de la UAM en la reducción de emisiones de CO ₂ y la contaminación acústica en áreas urbanas y rurales.
[R4]	https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/eb-105-vertiports.pdf	Informe Medioambiental sobre la Aviación Europea 2022
[R5]	https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/urban-air-mobility-uam	Estimaciones de crecimiento y adopción de UAM en Europa.
[R6]	https://rpas-drones.com/primer-cluster-nacional-dedicado-a-la-innovative-air-mobility-siam/	Primer clúster nacional dedicado a la innovativa air mobility (SIAM)
[R7]	https://www.avionrevue.com/drones/el-prototipo-de-evtol-concept-integrity-vuela-por-primera-vez-en-espana/	El prototipo de eVTOL "Concept Integrity" vuela por primera vez en España
[R8]	https://motor.elpais.com/actualidad/las-ciudades-de-espana-y-del-mundo-con-los-peores-atascos/	Informe que indica que Madrid ocupó el cuarto lugar en España en términos de congestión en 2019, con un nivel de congestión del 23%.
[R9]	https://www.mincotur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2020/Paginas/200203Np_Frontur-Egatur-diciembre.aspx	Datos oficiales que señalan que la Comunidad de Madrid recibió 7,6 millones de turistas internacionales en 2019, un incremento del 7% respecto al año anterior.
[R10]	https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/aeropuertos/aeropuertos-helipuertos-de-uso-publico-verificados/nuevas-infraestructuras	Información de la AESA sobre Infraestructuras aeroportuarias nuevas para helipuertos.
[R11.1]	https://es.wikipedia.org/wiki/Helipuerto_de_Algeciras	Información de Wikipedia sobre el Helipuerto de Algeciras.
[R11.2]	https://ingenieriareal.com/especificaciones-tecnicas-para-helipuertos/	Costo de construcción de un helipuerto según Ingeniería Real.
[R11.3]	https://cadenaser.com/andalucia/2024/10/04/aena-invertira-mas-de-230000-euros-en-el-helipuerto-de-algeciras-radio-algeciras/	Información de los gastos del Helipuerto de Algeciras según la Cadena Ser.

[R12.1]	https://www.icao.int/SAM/Documents/H-SAFETY-EFF/Manual%20de%20Helipuertos_Doc9261.pdf	Manual de helipuertos de la OACI
[R12.2]	https://www.icao.int/SAM/Documents/NAIDP-AMP1/Presentaci%C3%B3n_Desarrollo%20de%20Aeropuertos_Mauricio%20Gutiérrez.pdf	Manual de la OACI: Desarrollo de Aeropuertos – Mauricio Gutiérrez
[R13]	https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ff-2021-94619804-apn-dgiysaanac.pdf	Información de los costes asociados a este tipo de equipos según las características dictadas por la OACI
[R14]	https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10327/1531%202008.pdf?sequence=1	Manual para el Emplazamiento y Construcción de un Helipuerto Elevado en México
[R15]	https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/cera_09_gui_001_2_0.pdf	Guía Técnica para la Elaboración del Manual de Aeropuerto. AESA.
[R16]	https://www.aena.es/es/aerolineas/tarifas.html	Guías de tarifas de servicio de los aeropuertos de Aena. Aena.
[R17]	https://finmodelslab.com/es/blogs/operating-costs/helicopter-transportation-operating-costs	Costos operativos clave para el transporte de helicópteros
[R18]	https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-1380	BOE 2021 – Actualización de la parte pública del Programa Nacional de Seguridad para la Aviación Civil
[R19]	https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/G-DAU-ADUR-01_Aut_no_trans.pdf	Guía de autorización de aeródromos y helipuertos de uso restringido en España, AESA
[R20]	https://www.icea.es/es-ES/informaciondelseguro/totalsector/primas	Información del mercado asegurador y de primas por ICEA.
[R21]	https://www.eldiario.es/cantabria/helipuerto-valdecilla-costara-800-000-euros-construira-estructura-coronara-valdecilla-sur_1_10081146.html	Redacción del proyecto de construcción del helipuerto del hospital universitario Marqués de Valdecilla 800,000€
[R22]	https://www.lebrija.es/es/actualidad/noticias/Las-obras-para-construir-la-helisuperficie-del-Hospital-de-Lebrija-ascenderan-a-mas-de-300.000-euros/	Construcción de la helisuperficie del Hospital de Lebrija, más de 300,000€
[R23]	https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2020/tfg_287834/Helipuerto_Comercial_Trabajo_Final_Grado.pdf	TFG sobre Helipuerto Comercial
[R24]	https://aertecolutions.com/aviation/servicios-de-planificacion-y-diseño/	Servicios de planificación y diseño. Aertec.

[R25]	https://cincodias.elpais.com/companias/2024-11-23/golpe-de-ac-s-en-nueva-york-desarrollara-y-gestionara-el-futuro-vertipuerto-de-manhattan.html	Skyports y el desarrollo del futuro vertipuerto de Manhattan
[R26]	https://en.wikipedia.org/wiki/EHang	Wikipedia - EHang: Información general sobre EHang.
[R27]	https://www.batterydesign.net/ehang-eh216-s-evtol-battery/	Battery Design - Batería del EHang 216-S: Detalles sobre la batería del modelo EHang 216-S.
[R28]	https://evtol.news/ehang-216/	eVTOL News - EHang 216: Artículo específico sobre el EHang 216.
[R29]	https://www.ehang.com/news/1025.html	EHang Official News: Noticias oficiales del fabricante EHang sobre sus productos.
[R30]	https://www.volocopter.com/en/solutions/volocopter	Volocopter - VoloCity: Página oficial de Volocopter sobre el modelo VoloCity.
[R31]	https://www.thesun.ie/tech/13546970/inside-luxury-electric-lilium-vtol-jet/	The Sun - Lilium Jet: Artículo sobre las características del Lilium Jet.
[R32]	https://en.wikipedia.org/wiki/Joby_Aviation	Wikipedia - Joby Aviation: Información general sobre la empresa Joby Aviation.
[R33]	https://evtol.news/joby-s4/	eVTOL News - Joby S4: Artículo específico sobre el eVTOL Joby S4 2.0.
[R34]	https://aeronews.lavia.com/avion-experimental-joby-s4-evtol/	Aero News Lavia - Joby S4: Artículo sobre el modelo Joby S4 y su desarrollo.
[R35]	https://evtol.news/archer-maker	eVTOL News - Archer Maker: Detalles sobre el modelo Maker de Archer Aviation.
[R36]	https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_Aerospace	Wikipedia - Vertical Aerospace: Información general sobre Vertical Aerospace.
[R37]	https://newatlas.com/aircraft/vertical-aerospace-evtol-crash/	New Atlas - Vertical Aerospace VX4: Artículo sobre la seguridad y pruebas del VX4.
[R38]	https://evtol.news/beta-goes-the-distance	eVTOL News - Beta Alia-250: Artículo específico sobre el Alia-250 de Beta Technologies.
[R39]	https://airport-technology.com/projects/alia-250-electric-vertical-take-off-and-landing-evtol-aircraft/	Airport Technology - Beta Alia-250: Descripción de las características y especificaciones del Alia-250.
[R40]	https://www.thesun.ie/news/13486322/boeing-wisk-aero-flying-taxis/	The Sun - Wisk Aero Cora: Artículo sobre el modelo Cora y el desarrollo de los taxis aéreos de Wisk.
[R41]	https://evtol.news/kitty-hawk-cora/	eVTOL News - Kitty Hawk Cora: Artículo sobre el Cora, también conocido como Kitty Hawk.

[R42]	https://wisk.aero/faq/	Wisk Aero - FAQ: Sección de preguntas frecuentes del sitio oficial de Wisk Aero.
[R43]	https://en.wikipedia.org/wiki/Pipistrel	Wikipedia - Pipistrel: Información general sobre Pipistrel y sus productos.
[R44]	https://www.segre.com/es/comarcas/231031/video-prueban-alguaire-vehiculo-aereo-tripulado-empresa-ehan_233634.html	Prueba de vehículo aéreo tripulado EHang en Alguaire, Lleida.
[R45]	https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20221016/8567856/coche-volador-autonomo-galicia-ehang-eh216.html	EHang EH216, coche volador autónomo en Galicia.
[R46]	https://www.tourinews.es/resumen-de-prensa/notas-de-prensa-empresas-turismo/mallorca-menorca-aena-vuelos-prueba-taxis-aereos-volocopter-evtol_4483859_102.html	Vuelos de prueba de taxis aéreos en Mallorca y Menorca.
[R47]	https://cincodias.elpais.com/companias/2024-11-23/golpe-de-ac-s-en-nueva-york-desarrollara-y-gestionara-el-futuro-vertipuerto-de-manhattan.html	ACS desarrollará y gestionará el futuro vertipuerto de Manhattan.
[R48]	https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/eve-acciona-establecen-alianza-estrategica-para-acelerar-desarrollo-ecosistema-movilidad-aerea-urbana-sostenible/	Alianza estratégica entre Eve y ACCIONA para la movilidad aérea urbana sostenible.
[R49]	https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/3529069/seis-proyectos-europeos-relacionan-drones-space-colaboracion-consorcio-amu-led	Proyecto AMU-LED: integración de drones y U-Space en Europa.
[R50]	https://cincodias.elpais.com/companias/2024-11-23/golpe-de-ac-s-en-nueva-york-desarrollara-y-gestionara-el-futuro-vertipuerto-de-manhattan.html	ACS lidera proyecto del vertipuerto en Nueva York.
[R51]	https://cincodias.elpais.com/fortunas/2024-12-01/manuel-heredia-crisalion-queremos-liderar-la-movilidad-electrica-urbana-por-aire-y-por-tierra.html	Crisalion Mobility lidera la movilidad eléctrica urbana aérea y terrestre.
[R52]	https://actualidad aeroespacial.com/crisalion-mobility-recibe-una-inversion-del-cdti-de-54-millones-de-euros/	Inversión del CDTI en Crisalion Mobility por 5,4 millones de euros.
[R53]	https://www.horizonteeuropa.es/info/participar	Información sobre cómo participar en el programa Horizonte Europa.
[R54]	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM%3Ahorizon_europe	Horizonte Europa: programa europeo de investigación e innovación.

[R55]	https://www.mincotur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2023/Paginas/accelera-startups-listo-para-impulsar-el-crecimiento-y-desarrollo-de-6100-startups.aspx	Programa Acelera Startups para impulsar más de 6.100 startups en España.
[R56]	https://elpais.com/economia/especial-rsc/2024-11-29/startups-contras-las-brechas-digital-social-y-territorial.html	Startups contra las brechas digital, social y territorial.
[R57]	https://spain.representation.ec.europa.eu/empresas-y-financiacion/financiacion-para-pymes-y-start-ups-innovadoras_es	Financiamiento europeo para pymes y startups innovadoras.
[R58]	https://www.sesarju.eu/	Programa SESAR para modernizar la gestión del tráfico aéreo en Europa.
[R59]	https://www.eleconomista.es/infraestructuras-servicios/noticias/12506312/10/23/ferrovi-al-dara-entrada-a-un-inversor-para-impulsar-el-negocio-de-aerotaxis-en-el-mundo.html	Ferrovial busca inversor para expandir el negocio de aerotaxis a nivel mundial.
[R60]	https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/eve-acciona-establecen-alianza-estrategica-para-acelerar-desarrollo-ecosistema-movilidad-aerea-urbana-sostenible/	Colaboración entre Eve y ACCIONA para el desarrollo sostenible de la movilidad aérea urbana.
[R61]	https://cincodias.elpais.com/fortunas/2024-12-01/manuel-heredia-crisalion-queremos-liderar-la-movilidad-electrica-urbana-por-aire-y-por-tierra.html	Crisalion Mobility y su apuesta por la movilidad urbana disruptiva.
[R62]	https://www.kickstarter.com/	Plataforma Kickstarter como fuente de financiación para proyectos innovadores.
[R63]	https://www.garrigues.com/es_ES/noticia/bonos-verdes-camino-estandarizacion	Bonos verdes: el camino hacia su estandarización
[R64]	https://www.tesoro.es/deuda-publica/el-marco-de-bonos-verdes-del-reino-de-espana	El marco de bonos verdes del Reino de España
[R65]	https://www.ey.com/es_es/technical/novedades-regulatorias-sobre-sostenibilidad/publicado-el-european-green-bond-standard	Publicado el European green bond standard
[R66]	https://auditoria-audidores.com/articulos/articulo-auditoria-necesidades-de-revisi-n-y-certificaci-n-de-proyectos-verdes-y-financiaci-n/	Necesidades de revisión y certificación de proyectos 'verdes' y financiación

[R67]	https://portal.mineco.gob.es/es-es/comunicacion/paginas/210907_np_-bonosverdes.aspx	El éxito de la primera emisión de bonos verdes del Tesoro permite reducir el tipo de interés y ampliar la base inversora
--------------	---	--

Tabla 49. Referencias

También se incluyen todos los documentos y fuentes que, aunque no han sido referenciados directamente, han servido de base de conocimiento para muchos aspectos del trabajo:

Ref.	Descripción de la Fuente
[S1]	Entrevista con Mariano de la Roja, CEO de Vertiports Network
[S2]	Draft del engineering brief de la FAA, publicado en septiembre de 2024, también el publicado en enero de 2025.
[S3]	Entrevista con Miguel Ángel Vilaplana, responsable en España de UTM de Airbus.
[S4]	BLUENEST UAM-Vertiports Whitepaper
[S5]	EASA Prototype Technical Specifications for VFR Vertiports Design
[S6]	Libro Blanco de I+D+i para la Aviación No Tripulada en España
[S7]	Urban Air Mobility White Paper (ASD)
[S8]	Propuesta de Enmienda 2022-12: Regulación de Vertipuertos y Helipuertos
[S9]	Urban Air Mobility Concept of Operations for the London Environment

Tabla 50. Fuentes.

11 Abreviaturas y Términos

A continuación, se presentan las abreviaturas y términos utilizados en el TFM a modo de glosario para consulta:

Abreviatura	Significado
ACCIONA	Empresa multinacional especializada en infraestructuras sostenibles y energías renovables
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
AMU-LED	Air Mobility Urban - Large Experimental Demonstrations (Proyecto europeo de movilidad aérea urbana)
CAGR	Tasa de Crecimiento Anual Compuesta
CDTI	Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial
CEI	Consejo Europeo de Innovación
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EH216	Modelo de eVTOL desarrollado por EHang
eVTOL	Electric Vertical Take-Off and Landing
FAA	Federal Aviation Administration
Horizonte Europa	Programa de investigación e innovación de la Comisión Europea
IDOM	Empresa de ingeniería y consultoría destacada en proyectos de infraestructuras
MTOM	Maximum Take-Off Mass (Masa Máxima al Despegue)
PPP	Public-Private Partnership
SESAR	Single European Sky ATM Research
SESAR 3	Programa europeo de investigación y desarrollo de la gestión del tráfico aéreo
SIAM	Sistema de Movilidad Aérea Innovadora
TFM	Trabajo de Fin de Máster
TIR	Tasa Interna de Retorno
UAM	Urban Air Mobility (Movilidad Aérea Urbana)
U-Space	Urban Space Management Framework (Gestión del Espacio Aéreo Urbano)
USSP	U-Space Service Provider



UTM	Unmanned Traffic Management
VAN	Valor Actual Neto
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

Tabla 51. Abreviaturas y Términos.

12 Anexos

12.1 Detalle Financiero y Proyecciones



Detalle Financiero y
Proyecciones TFM - I