



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

FINAL PROJECT REPORT

Drones y eVTOL en el sector sanitario

Mar Mas Orriols

Curso 2024-2025

Título: Drones y eVTOL en el sector sanitario

Autor: Mar Mas Orriols

Tutor: Ernesto de la Fuente Cantarino

Titulación: Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Curso: 2024-2025



RESUMEN

Este proyecto explora la integración de drones y eVTOL en la logística sanitaria, analizando sus capacidades técnicas, eficiencia operativa y viabilidad económica. A través de casos reales, se destaca su potencial transformador para reducir tiempos de respuesta, optimizar procesos logísticos y mejorar la accesibilidad a los servicios médicos, especialmente en áreas remotas o de difícil acceso. Además, su bajo impacto ambiental se alinea con los objetivos de sostenibilidad del sector sanitario.

El estudio resalta el desarrollo proactivo de marcos regulatorios europeos, liderados por la EASA, que apoyan la integración segura de estas tecnologías en el espacio aéreo urbano. Los drones, debido a su facilidad de implementación, han alcanzado una mayor adopción en la entrega de medicamentos y muestras biológicas, mientras que los eVTOL, con mayor alcance y capacidad de carga, están preparados para abordar necesidades logísticas más complejas. Los eVTOL se presentan como una alternativa a los helicópteros convencionales que presentan ventajas en términos de menor consumo energético, mantenimiento simplificado, estabilidad y sostenibilidad.

El proyecto incluye un análisis práctico en el Hospital Vall d'Hebron, donde se identifican desafíos logísticos que estas tecnologías podrían resolver, destacando su amplio potencial y estableciendo las bases para futuras aplicaciones adaptadas a necesidades específicas.

En conclusión, los drones y eVTOL tienen el potencial de revolucionar la logística en múltiples sectores, promoviendo sistemas más eficientes, equitativos y sostenibles. Su adopción masiva está cada vez más cerca, marcando el inicio de una nueva era en la movilidad aérea y la gestión logística.

Palabras clave: drones, eVTOL, logística sanitaria, normativa, Hospital Vall d'Hebron, sostenibilidad.

ABSTRACT

This project explores the integration of drones and eVTOL in healthcare logistics, analyzing their technical capabilities, operational efficiency, and economic viability. Through real-world cases, their transformative potential is highlighted in reducing response times, optimizing logistical processes, and improving accessibility to medical services, particularly in remote or hard-to-reach areas. Moreover, their low environmental impact aligns with the sustainability goals of the healthcare sector.

The study emphasizes the proactive development of European regulatory frameworks, led by EASA, which support the safe integration of these technologies into urban airspace. Drones, due to their ease of implementation, have achieved wider adoption in the delivery of medications and biological samples, while eVTOL, with greater range and load capacity, are poised to address more complex logistical needs. eVTOL also present themselves as an alternative to conventional helicopters, offering advantages in terms of lower energy consumption, simplified maintenance, stability, and sustainability.

The project includes a practical analysis at Hospital Vall d’Hebron, identifying logistical challenges that these technologies could address, highlighting their broad potential, and establishing the foundation for future applications tailored to specific needs.

In conclusion, drones and eVTOL have the potential to revolutionize logistics across multiple sectors, promoting more efficient, equitable, and sustainable systems. Their widespread adoption is increasingly imminent, marking the beginning of a new era in aerial mobility and logistical management.

Key words: drones, eVTOL, healthcare logistics, regulation, Hospital Vall d’Hebron, sustainability.

Índice de contenidos

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	5
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Problemática.....	9
1.2 Objetivos del proyecto.....	9
1.3 Estructura del informe.....	10
Capítulo 2. MARCO CONCEPTUAL.....	11
2.1 Análisis de necesidades en el sector sanitario.....	11
2.2 Aplicaciones actuales en el sector sanitario.....	14
2.3 Tipos de drones y eVTOL adecuados para aplicaciones sanitarias.....	18
2.3.1 Cadena de frío.....	23
Capítulo 3. MARCO NORMATIVO y REGULACIÓN.....	25
3.1 Marco Normativo Europeo.....	25
3.1.1 Requisitos Operacionales, Licencias y Certificaciones.....	25
3.1.2 Infraestructura.....	31
3.2 Marco Normativo Nacional: España.....	39
Capítulo 4. EVALUACIÓN DE IMPACTO.....	42
4.1 Impacto social.....	42
4.2 Impacto económico.....	44
4.3 Impacto ambiental y sostenibilidad.....	50
Capítulo 5. EJEMPLO PRÁCTICO.....	52
5.1 Contexto y situación actual.....	52
5.1.1 Logística actual del Hospital Vall d’Hebron.....	52
5.1.2 Limitaciones del sistema actual e identificación de necesidades.....	53
5.1.3 Infraestructura existente.....	54
5.2 Propuesta.....	56
5.2.1 Estimación de Costos.....	63
Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	66
REFERENCIAS.....	68

Figuras

Figura 1. Relación entre el retraso en minutos de los servicios de emergencia y el porcentaje de supervivientes ajustado a 30 días, representado para tres períodos distintos.....	14
Figura 2. Proyección del mercado global de drones médicos para el período 2023-2033.....	16
Figura 3. Rutas operativas de Zipline en Ruanda capturadas el 14 de agosto de 2023. Cada flecha representa un dron en vuelo.....	17
Figura 4. Dron Eiger de Rigitech.....	19
Figura 5. Dron M2 de Matternet.....	20
Figura 6. Línea Cronológica con las principales publicaciones de la EASA para aeronaves VTOL desde 2019 hasta 2024.....	29
Figura 7. Estación de carga autónoma de Zipline para su dron P2.....	32
Figura 8. Estación de carga autónoma de Matternet para su dron M2.....	33
Figura 9. Parámetros genéricos asociados al procedimiento de despegue y aterrizaje vertical..	36
Figura 10. Dimensión “D”.....	37
Figura 10. Marcaje de identificación de vertipuertos hospitalarios (izquierda) y vertipuertos genéricos (derecha).....	38
Figura 12. Disposición de chevrones verdes iluminados en los marcajes de vertipuertos hospitalarios.....	38
Figura 13. Costos estimados de construcción de vertipuertos según tamaño y capacidad.....	48
Figura 14. Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d’Hebron.....	55
Figura 15. Helipuerto del Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d’Hebron desde abajo.....	56
Figura 16. Cobertura del dron Eiger desde el Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d’Hebron y localización de hospitales en Cataluña.....	57
Figura 17. Ubicación del nuevo y antiguo helipuerto y del helipuerto provisional.....	58
Figura 18. Ejemplos de posibles vertipuertos con el volumen de referencia Tipo 1 establecidos en el antiguo helipuerto del hospital Vall d’Hebron (solo con fines ilustrativos; para evaluar su idoneidad real sería necesario un estudio técnico detallado).....	60

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La transformación digital y tecnológica está revolucionando diversos sectores, y el ámbito sanitario no es una excepción. Este proyecto analiza el potencial de integración de drones y vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) en la logística sanitaria, enfocándose en cómo estas tecnologías pueden abordar los desafíos actuales de transporte, eficiencia y accesibilidad. En un contexto donde los sistemas de salud enfrentan demandas crecientes y limitaciones operativas, estas innovaciones ofrecen soluciones prometedoras para optimizar procesos y mejorar la calidad de atención.

El principal objetivo de este proyecto es evaluar la viabilidad de implementar drones y eVTOL en operaciones sanitarias, identificando las necesidades específicas del sector, las oportunidades tecnológicas y los retos normativos y económicos asociados. Se busca proporcionar un análisis integral que abarque desde los aspectos conceptuales hasta un ejemplo práctico basado en el Hospital Vall d'Hebron, el principal centro médico de Cataluña. Este enfoque permitirá visualizar cómo estas tecnologías pueden contribuir a superar barreras logísticas y mejorar la atención sanitaria en entornos diversos.

1.1 Problemática

La logística sanitaria actual enfrenta retos significativos, desde la distribución de medicamentos en áreas rurales o de difícil acceso, hasta el transporte urgente de órganos o equipos médicos en emergencias críticas. En muchas ocasiones, las infraestructuras convencionales no son suficientes para garantizar una respuesta rápida y eficiente. Esta limitación afecta directamente a la calidad de la atención, especialmente en situaciones donde el tiempo de respuesta es crucial para mejorar las tasas de supervivencia y reducir las secuelas en el paciente. Condiciones como infartos, ictus o politraumatismos requieren intervenciones rápidas que las infraestructuras y métodos tradicionales no siempre pueden proporcionar.

En este contexto, los drones y eVTOL emergen como alternativas capaces de superar estas limitaciones, ofreciendo mayor rapidez, flexibilidad y sostenibilidad en comparación con los métodos tradicionales.

Este proyecto responde a la necesidad de explorar y evaluar estas tecnologías, identificando su potencial para transformar la logística sanitaria mediante la optimización de recursos, la reducción de tiempos de respuesta y el aumento de la accesibilidad a servicios de salud en distintas regiones.

1.2 Objetivos del proyecto

El proyecto tiene como objetivo principal analizar las posibilidades de integración de drones y eVTOL en el sector sanitario, abordando los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las necesidades logísticas del sector sanitario y las oportunidades que ofrecen estas tecnologías.
- Evaluar las capacidades técnicas y operativas de drones y eVTOL en diferentes aplicaciones sanitarias.
- Analizar el marco normativo y los requisitos regulatorios asociados a la implementación de estas tecnologías.
- Estimar los costos de inversión y operación, proporcionando una visión económica integral.
- Proponer soluciones prácticas que reflejen la aplicabilidad real de estas tecnologías, ejemplificadas en el Hospital Vall d'Hebron.

1.3 Estructura del informe

El informe está estructurado en seis capítulos que abarcan desde los fundamentos conceptuales hasta las conclusiones finales:

- **Capítulo 1: Introducción.** Presenta los antecedentes, objetivos y organización del proyecto.
- **Capítulo 2: Marco conceptual.** Aborda las necesidades del sector sanitario, las aplicaciones actuales de drones y eVTOL, y analiza los modelos más adecuados para operaciones sanitarias específicas, incluyendo la logística de la cadena de frío.
- **Capítulo 3: Marco normativo y regulación.** Examina los requisitos regulatorios a nivel europeo y nacional, incluyendo licencias, certificaciones e infraestructura necesaria.
- **Capítulo 4: Evaluación de impacto.** Analiza los efectos sociales, económicos y ambientales de la integración de estas tecnologías en la logística sanitaria, comparando su desempeño con métodos convencionales como los helicópteros.
- **Capítulo 5: Ejemplo práctico.** Ilustra la aplicabilidad de drones y eVTOL en el Hospital Vall d'Hebron, destacando el contexto actual, las soluciones propuestas y una estimación de costos que evalúa su viabilidad económica.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros.** Resume los hallazgos principales y propone líneas de investigación para el desarrollo e implementación futura de estas tecnologías.

Esta estructura ofrece una visión integral del proyecto, permitiendo al lector comprender tanto los aspectos técnicos como las implicaciones prácticas y estratégicas de la integración de drones y eVTOL en el sector sanitario.

Capítulo 2. MARCO CONCEPTUAL

Este capítulo aborda cómo los drones y los vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL), están transformando el sector sanitario. Estas herramientas no solo ofrecen soluciones a desafíos logísticos y operativos, sino que también abren nuevas posibilidades para mejorar la equidad, la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de salud.

Uno de los aspectos más críticos analizados en este capítulo es la atención de emergencias y la reducción del tiempo de respuesta, donde cada minuto resulta determinante para salvar vidas y minimizar secuelas. En situaciones de emergencia, como paros cardíacos, ictus y politraumatismos, la rapidez en la intervención puede ser significativa para el pronóstico del paciente. Los drones y eVTOL, con su capacidad de superar obstáculos geográficos y llegar rápidamente al lugar donde se requiere asistencia, se presentan como soluciones efectivas para transportar desfibriladores, medicamentos, muestras biológicas o incluso órganos para trasplantes en tiempos considerablemente menores que los métodos convencionales.

Más allá de las emergencias, este capítulo aborda otras necesidades del sector sanitario, como la logística de suministros y el transporte seguro de materiales críticos. En entornos urbanos, los drones han demostrado su eficacia para realizar entregas rápidas y precisas en áreas densamente pobladas, mientras que en zonas rurales o aisladas, pueden salvar barreras de infraestructura para entregar medicamentos o muestras en tiempo récord. Por su parte, los eVTOL amplían estas capacidades al poder cubrir mayores distancias, transportar volúmenes más grandes y operar en regiones donde las condiciones de difícil acceso requieren soluciones logísticas avanzadas. La combinación de ambas tecnologías permite una cobertura más versátil y efectiva para satisfacer las necesidades del sector sanitario.

Además, se profundiza en los tipos de drones y eVTOL más adecuados para aplicaciones sanitarias específicas, analizando sus capacidades técnicas y operativas. Se abordan aspectos como la capacidad de carga, la autonomía, la configuración de diseño (ala fija, multirrotor o híbrida) y su idoneidad para distintas necesidades logísticas. Estos análisis técnicos se acompañan de casos prácticos que ilustran la implementación de estas tecnologías en contextos reales.

Finalmente, se incluye una sección dedicada a la cadena de frío, un componente crítico en la logística sanitaria, especialmente para productos médicos sensibles como vacunas, medicamentos y muestras biológicas. Tanto los drones como los eVTOL están siendo equipados con tecnologías avanzadas para mantener condiciones térmicas controladas durante el transporte, garantizando la integridad de estos productos desde su origen hasta el destino final.

2.1 Análisis de necesidades en el sector sanitario

La finalidad de todo sistema de salud es mejorar el bienestar general de la población, logrando el mejor nivel de salud posible a lo largo de todo el ciclo de vida. Para alcanzar este objetivo, es

imprescindible contar con un sistema sanitario efectivo que pueda responder tanto a las necesidades cotidianas como a las emergencias y crisis de salud pública.

Los principales objetivos del sector sanitario son los siguientes:

1. **Mejorar la salud de la población:** Reducir la incidencia de enfermedades, mejorar la calidad de vida y aumentar la esperanza de vida son metas fundamentales. Esto implica no solo prevenir y tratar enfermedades, sino también promover estilos de vida saludables y brindar servicios de rehabilitación que permitan a las personas recuperar o mantener su calidad de vida.
2. **Proveer acceso equitativo a los servicios de salud:** Un sistema sanitario debe garantizar que todas las personas, independientemente de su ubicación geográfica o su situación económica, tengan acceso a servicios de salud de calidad. La equidad en el acceso es crucial para asegurar que toda la población pueda recibir una atención adecuada cuando la necesite, minimizando disparidades y promoviendo la justicia social en el ámbito de la salud.
3. **Asegurar la calidad y seguridad de los servicios de salud:** La atención sanitaria debe ser segura, efectiva y basada en la evidencia científica, protegiendo a los pacientes de riesgos innecesarios y mejorando la eficacia de los tratamientos. La seguridad del paciente y la gestión de riesgos son componentes esenciales que ayudan a ganar la confianza de la población en los servicios sanitarios.
4. **Optimizar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de salud:** La gestión eficiente de los recursos financieros, humanos y materiales es clave para que los sistemas de salud puedan responder a las necesidades de la población sin comprometer su viabilidad a largo plazo. En este sentido, maximizar la eficiencia operativa permite hacer un mejor uso de los recursos disponibles y mejorar la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia.

Para alcanzar estos objetivos, el sistema sanitario enfrenta diversos desafíos operativos y logísticos que requieren soluciones innovadoras. A continuación, se detallan algunas de las principales necesidades y desafíos del sector sanitario, donde la implementación de drones o vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical podría ofrecer soluciones significativas:

- **Logística de Suministros:** La distribución eficiente y rápida de suministros médicos en áreas remotas o de difícil acceso es un desafío fundamental. La posibilidad de utilizar drones para realizar entregas de medicamentos, equipos médicos y otros suministros críticos podría reducir la dependencia de infraestructuras de transporte convencionales, aliviando la carga en las carreteras y optimizando el tiempo de entrega, especialmente en situaciones de emergencia o en regiones de acceso limitado.
- **Atención de Emergencias y Reducción del Tiempo de Respuesta:** En situaciones de emergencia, el tiempo de respuesta es crucial para mejorar las tasas de supervivencia y reducir las secuelas en el paciente. En el contexto de los servicios de emergencia, el

tiempo de respuesta se refiere al intervalo entre el momento en que se recibe una llamada de emergencia y el momento en que el equipo de emergencia llega al lugar del incidente. Existen condiciones específicas, como ictus, politraumatismos y síndrome coronario agudo, donde el tiempo de atención influye directamente en la efectividad de la intervención y, por tanto, en la reducción de la mortalidad y mejora de la calidad de vida futura del paciente. Los drones podrían desempeñar un papel importante en la reducción del tiempo de respuesta, por ejemplo, mediante el transporte rápido de desfibriladores en casos de paro cardíaco o el envío urgente de órganos para trasplantes. La Asociación Americana del Corazón (AHA) y el Consejo Europeo de Reanimación (ERC) confirman que la tasa de supervivencia de un paro cardíaco disminuye entre un 7% y un 10% por cada minuto sin tratamiento, y que la desfibrilación en los primeros 3-5 minutos puede aumentar la supervivencia hasta el 50-70%.

En España, las comunidades autónomas gestionan su propio sistema de salud, lo que a veces genera variaciones en los tiempos de respuesta de emergencias médicas entre regiones. Por ejemplo, el tiempo de respuesta medio registrado en Castilla y León en 2023 fue de 15 minutos y 8 segundos, mientras que en Madrid fue de 9 minutos y 19 segundos. Sin embargo, el tiempo de respuesta óptimo puede variar dependiendo de varios factores, como el tipo de emergencia y las condiciones del paciente.

Existen numerosos estudios que analizan la relación entre los tiempos de respuesta de los servicios de emergencia y la supervivencia de los pacientes. Por ejemplo, en el estudio realizado en [0], se incluyeron más de 20000 casos de Paro Cardíaco Extrahospitalario (OHCA) entre 2008 y 2017, y se utilizaron los datos del Registro Sueco de Reanimación Cardiopulmonar (SRCR). Este análisis muestra cómo el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia (EMS) influye en la supervivencia a los 30 días (Figura 1).

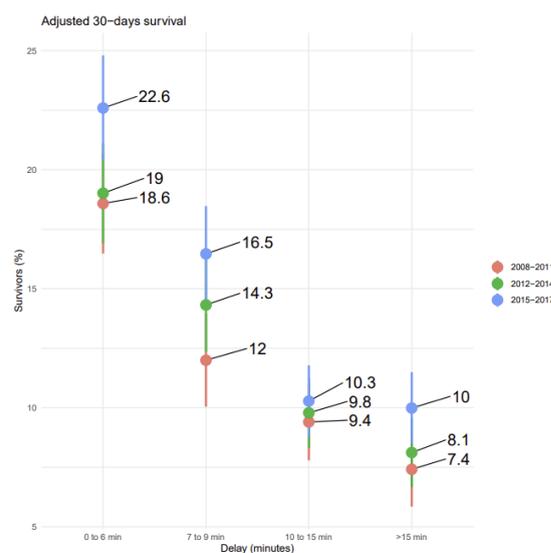


Figura 1. Relación entre el retraso en minutos de los servicios de emergencia y el porcentaje de supervivientes ajustado a 30 días, representado para tres períodos distintos. Fuente: [0]

Es importante destacar que, si bien no se puede generalizar un número de minutos ideal, los estudios evidencian que cuanto más rápido sea el tiempo de respuesta, mejor será el pronóstico para el paciente.

- **Transporte de Muestras de Laboratorio:** El traslado rápido y seguro de muestras de laboratorio entre centros médicos y laboratorios de análisis es una necesidad operativa clave, especialmente en áreas donde las muestras deben ser procesadas en centros especializados que se encuentran a cierta distancia. Utilizar drones para este propósito podría acelerar los tiempos de diagnóstico y tratamiento, y contribuir a una gestión de recursos más eficiente.
- **Eficiencia Operativa:** La integración de nuevas tecnologías en el sector sanitario no solo tiene el potencial de mejorar la eficacia de los servicios, sino que también contribuye a la sostenibilidad del sistema al optimizar los recursos humanos y materiales. Los drones y VTOL podrían ser una herramienta estratégica para reducir costes operativos y mejorar la capacidad de respuesta del sistema sanitario, especialmente en situaciones de alta demanda o emergencia.

En conclusión, la implementación de drones y tecnologías afines en el sector sanitario ofrece una oportunidad para abordar de manera innovadora algunos de los desafíos más críticos del sistema de salud, tales como la logística de suministros, la respuesta ante emergencias, el transporte de muestras médicas y la eficiencia general del sistema. Este enfoque puede contribuir no solo a mejorar la calidad de la atención, sino también a incrementar la sostenibilidad y la equidad en el acceso a servicios sanitarios de calidad.

2.2 Aplicaciones actuales en el sector sanitario

La incorporación de drones en el sector sanitario ha crecido considerablemente, impulsada tanto por la innovación tecnológica como por la necesidad de soluciones logísticas rápidas y eficientes. Cabe destacar que la pandemia de COVID-19 aceleró la adopción de drones en la atención sanitaria, debido a su capacidad para minimizar el contacto humano y transportar medicamentos y equipos médicos de manera rápida y segura.

Tras el impulso inicial que ha recibido la implementación de drones en el sector sanitario, el mercado de drones médicos muestra un crecimiento acelerado y un alto potencial de expansión. Con un valor de 318,9 millones de dólares en 2022, se proyecta que alcance 3176,7 millones de dólares para 2033 con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 24,3%. Este crecimiento está siendo impulsado por avances tecnológicos y un creciente interés de gobiernos y empresas por innovar en la logística médica.

El mercado de drones médicos se segmenta en función de varios factores clave, tales como el tipo de dron, la capacidad de carga, la tecnología utilizada y las aplicaciones específicas dentro

del sector sanitario. A continuación, se describen las principales categorías y su situación actual en el mercado:

1. **Tipo de dron:** Los drones de ala rotatoria representan el 53,7% de la cuota de mercado en 2023, gracias a su habilidad para despegar y aterrizar en espacios reducidos, lo cual es esencial en áreas urbanas o de acceso limitado.
2. **Capacidad de carga:** El segmento de drones con una capacidad de carga de menos de 2 kg domina el mercado, representando una cuota de mercado del 39.5% en 2023. Estos drones son ideales para el transporte de medicamentos, muestras de laboratorio y otros suministros médicos de pequeño tamaño. La popularidad de este segmento está impulsada por la facilidad de obtener permisos regulatorios para operaciones con drones pequeños, lo que permite a los fabricantes y proveedores de servicios expandirse más rápidamente.
3. **Aplicación:** Una de las aplicaciones más significativas para los drones médicos es la entrega de vacunas y medicamentos, con una cuota de mercado del 32,2% en 2023.
4. **Tecnología:** Los drones médicos pueden ser totalmente autónomos, semiautónomos u operados de forma remota. Según [9], se prevé que el segmento de drones operados de forma remota sea el más grande debido a la alta tasa de adopción de estos sistemas para diversas aplicaciones médicas.

En la Figura 2 se muestra la proyección del mercado global de drones médicos para el período 2023-2033. La imagen destaca el valor de mercado esperado, la tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) y la participación de los diferentes tipos de drones y segmentos regionales, proporcionando una visión general del potencial de expansión de este sector. Cabe destacar que Europa lidera actualmente en cuota de mercado, seguida por América del Norte y Asia Oriental.

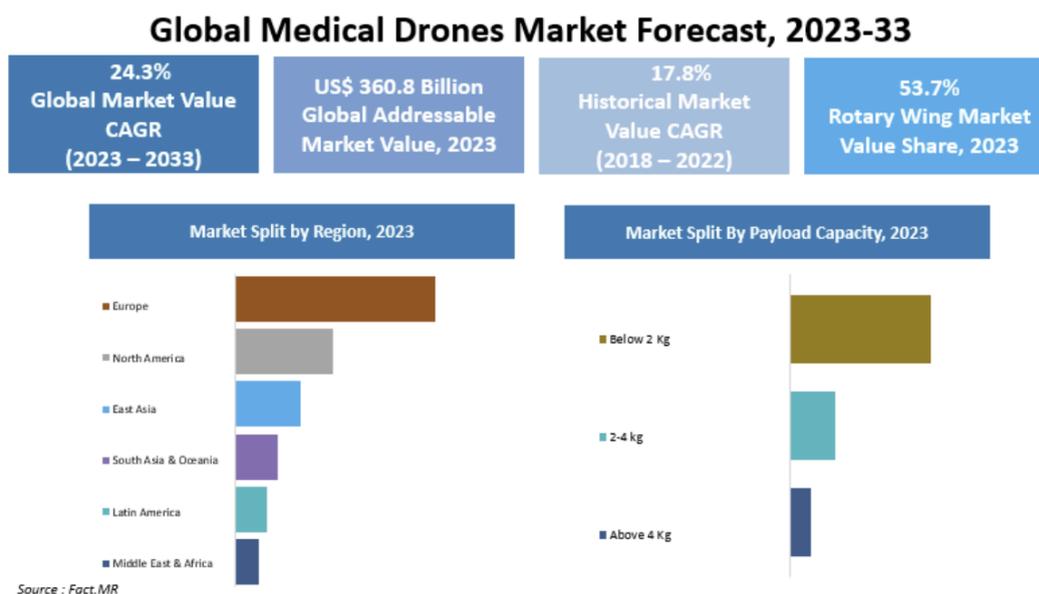


Figura 2. Proyección del mercado global de drones médicos para el período 2023-2033.

Fuente: [8]

Tras analizar la situación actual del mercado y sus segmentos, se presentan algunos ejemplos en diferentes partes del mundo de cómo estas innovaciones están siendo implementadas para mejorar la atención sanitaria:

1. Suiza: Transporte de Muestras Médicas con Drones.

Desde 2017, la empresa Matternet, ha llevado a cabo pruebas y operaciones piloto en el ámbito del transporte médico con drones en ciudades como Lugano, Berna y Zúrich. Estas iniciativas han permitido evaluar la viabilidad del envío rápido y eficiente de muestras de laboratorio y otros suministros médicos entre hospitales. Un ejemplo relevante es la ruta de cinco kilómetros entre los hospitales Triemli y Waid en Zúrich, que fue implementada temporalmente en diciembre de 2022 como parte de un proyecto piloto para el transporte sanitario urbano.

Además de sus operaciones en Suiza, Matternet ha llevado a cabo proyectos relevantes en Estados Unidos y Alemania, acumulado más de 20000 vuelos sobre áreas pobladas hasta la fecha.

2. Ruanda: Entrega de Sangre y Medicamentos a Zonas Remotas.

La empresa Zipline lleva operando en Ruanda desde 2016, utilizando drones para entregar sangre y medicamentos en áreas rurales de difícil acceso. Actualmente, Ruanda cuenta con dos centros de distribución de Zipline, ubicados en Muhanga y cerca de Kayonza, desde donde se han establecido rutas regulares que permiten a los hospitales remotos recibir suministros médicos en menos de 30 minutos, cuando antes el trayecto podía ser de varias horas (Figura 3). La geografía montañosa del país y las malas condiciones de las carreteras en áreas rurales hacen que un sistema de entrega aérea resulte considerablemente más eficiente que el uso de vehículos terrestres convencionales. Hasta la fecha, Zipline ha entregado más de 450000 paquetes, más de 4,5 millones de productos y ha volado más de 30 millones de millas de forma autónoma.

La implementación de este sistema ha tenido un impacto notable en los resultados de salud. Al centralizar casi todo el suministro de sangre y enviar componentes a demanda, Zipline ha logrado reducir las caducidades de sangre en un 67% durante sus primeros tres años de operación. Además, gracias a la entrega bajo demanda, Zipline ha contribuido a reducir la mortalidad materna por hemorragia postparto en hospitales ruandeses en un 51%. Este modelo ha sido replicado en Ghana y otros países africanos, donde también se han obtenido resultados significativos en la mejora del acceso a servicios de salud esenciales.

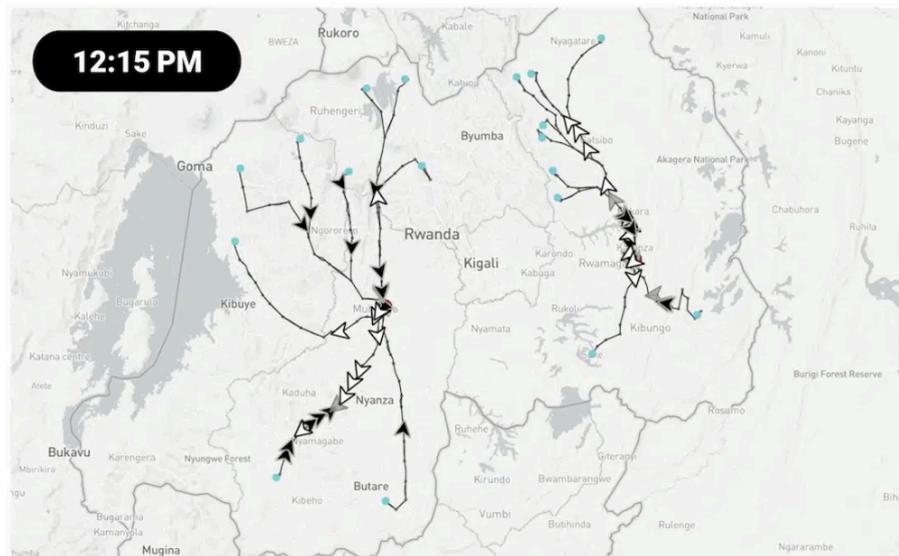


Figura 3. Rutas operativas de Zipline en Ruanda capturadas el 14 de agosto de 2023. Cada flecha representa un dron en vuelo. Fuente: [13]

3. Reino Unido.

Recientemente, en Londres, se ha establecido una ruta de entrega de muestras de sangre mediante drones de la compañía Wing entre los hospitales Guy's y St Thomas'. Esta ruta opera de lunes a viernes, con hasta 10 transferencias bajo demanda al día. Los drones transportan las muestras en contenedores médicos seguros, permitiendo un tiempo de entrega de menos de 3 minutos entre ambos hospitales. Este logro es significativo, ya que operar drones en áreas urbanas congestionadas presenta desafíos únicos en términos de seguridad, regulación y tecnología. Este avance ha sido posible gracias a la colaboración con la Autoridad de Aviación Civil del Reino Unido (CAA) y el sistema nacional de salud pública, quienes han trabajado conjuntamente para definir corredores aéreos seguros y establecer protocolos de operación en esta zona urbana compleja.

En España, se han realizado varios proyectos piloto y estudios de viabilidad para evaluar el impacto y la eficacia de los drones en la logística sanitaria. Sin embargo, hasta la fecha, no existen rutas establecidas y operativas de manera continua en el sector sanitario. Entre las iniciativas más destacadas se encuentra el proyecto ALE-HOP, que finalizó en julio de 2023 con una demostración realizada entre el Hospital Universitario La Paz y el Hospital Universitario 12 de octubre de Madrid.

Aunque el uso de drones en el sector sanitario está en constante crecimiento, los eVTOLs emergen como una tecnología complementaria con un potencial único para transformar la logística médica. A diferencia de los drones, que actualmente se enfocan en el transporte de suministros médicos ligeros, los eVTOLs están diseñados para transportar cargas mayores y, en un futuro, podrían trasladar pacientes o personal médico. Sin embargo, actualmente el uso de eVTOLs en el sector sanitario se encuentra en fases de desarrollo y pruebas piloto en varios países, por lo que aún no se han implementado operaciones regulares.

2.3 Tipos de drones y eVTOL adecuados para aplicaciones sanitarias

El diseño y las capacidades técnicas de drones y eVTOLs son fundamentales para determinar su idoneidad en aplicaciones sanitarias. Según las necesidades específicas, como la distancia a cubrir, la carga a transportar o la urgencia del servicio, algunos tipos de aeronaves resultan más adecuados que otros.

Como se ha visto en la sección anterior, los drones multirrotor destacan en el ámbito de la logística sanitaria. Estos, pueden tener distintas configuraciones según el número de hélices, donde cada rotor genera sustentación de manera independiente. Esta característica de diseño les permite despegar y aterrizar verticalmente, además de ofrecer una alta maniobrabilidad, lo que los hace ideales para operaciones en entornos urbanos o áreas con accesos limitados. Sin embargo, su capacidad de carga está limitada a unos pocos kilogramos y su autonomía suele oscilar entre 20 y 60 minutos, dependiendo del diseño y la carga.

Por otro lado, los drones de ala fija se diferencian de los multirrotores en que generan sustentación mediante alas estáticas, como un avión convencional. Este diseño los hace mucho más eficientes en cuanto a consumo de energía, permitiéndoles tener una autonomía significativamente mayor y transportar cargas más pesadas. Sin embargo, los drones de ala fija no pueden despegar y aterrizar verticalmente, lo que los limita en entornos urbanos densos. Además, no pueden realizar vuelos estacionarios, lo que reduce su utilidad en aplicaciones que requieren movimientos precisos en espacios pequeños.

Un ejemplo destacado de un dron de ala fija es el utilizado por la empresa Zipline, con una fuerte presencia en países como Ruanda y Ghana (véase 2.2). Sin embargo, en marzo de 2023 presentaron un modelo híbrido que combina las ventajas del despegue y aterrizaje vertical con la eficiencia del vuelo de ala fija. Este modelo, actualmente en operaciones comerciales en algunas regiones de Estados Unidos, puede transportar hasta 3,6 kg y alcanzar una velocidad de crucero de 113 km/h, con un rango máximo de vuelo de 38,6 km en un solo sentido (véase ficha técnica [21]). Sin embargo, este modelo híbrido todavía no se ha implementado para operaciones sanitarias, donde el modelo de ala fija sigue siendo predominante.

Por otro lado, el dron Eiger, desarrollado por Rigitex, es un modelo híbrido que ha sido probado con éxito en el ámbito sanitario. Este, puede transportar hasta 3 kg en contenedores médicos certificados (UN3373), lo que equivale a 150-300 muestras de sangre. Estos contenedores están diseñados para mantener las condiciones óptimas de transporte. Durante su operación, el dron alcanza una velocidad de crucero de 6 m/s en modo multirrotor, mientras que en modo de ala fija puede volar a una velocidad de 29 m/s. Su diseño también le permite operar en condiciones de viento, soportando ráfagas de hasta 12 m/s en modo multirrotor y hasta 15 m/s en modo de ala fija.

El Eiger está diseñado para operaciones BVLOS (más allá de la línea de visión), ofreciendo una autonomía que varía en función de la carga transportada. Sin carga, puede cubrir una distancia de hasta 100 km en un tiempo aproximado de 57 minutos. Con una carga máxima de 3 kg, su autonomía se reduce a 80 km, completando el trayecto en unos 46 minutos (véase ficha técnica [19]).



Figura 4. Dron Eiger de Rigittech. Fuente: [20]

Para la entrega de paquetes, el Eiger ofrece dos métodos principales:

- Aterrizaje completo: El dron desciende y aterriza directamente en el punto de entrega, donde la carga útil es descargada manualmente. Para garantizar la precisión, el Eiger utiliza cámaras integradas que detectan patrones visuales o códigos QR colocados en el suelo, permitiendo identificar el lugar exacto de aterrizaje.
- Sistema de liberación de carga sin aterrizaje: El Eiger está equipado con un mecanismo opcional que permite liberar la carga desde el aire sin necesidad de aterrizar. Este sistema incorpora una cápsula de carga secundaria ubicada debajo del cuerpo principal del dron, manteniendo la funcionalidad del compartimento de carga principal. Al llegar al punto de entrega, el dron libera la cápsula de forma precisa sobre una plataforma de recepción designada.

En junio de 2024, el Eiger participó en un evento de demostración donde realizó un vuelo desde el Área Básica de Salud (ABS) de Vall d'en Bas hasta el Hospital de Olot. Durante este vuelo, el dron completó el trayecto en solo 7 minutos, logrando una reducción del tiempo de transporte en un 60% en comparación con métodos terrestres tradicionales y disminuyendo significativamente la huella de carbono.

Además, Rigittech ofrece un sistema en la nube, denominado RigiCloud, el cual permite la gestión de las operaciones del dron de forma remota. Esta plataforma ofrece funcionalidades como planificación de rutas, telemetría en tiempo real, protocolos de emergencia, integración de sensores avanzados y escalabilidad para gestionar múltiples drones simultáneamente.

Como se ha mencionado en la sección 2.2, la empresa Matternet ha desempeñado un papel destacado en la integración de drones en el sector sanitario, con operaciones y pruebas en diversos países. Matternet ha utilizado dos modelos principales de drones en sus operaciones y pruebas: el M1 y el M2. El modelo M1 fue utilizado principalmente en las primeras pruebas y operaciones piloto de la empresa en lugares como Suiza y Estados Unidos. Más recientemente, se ha optado por el modelo M2, una versión más avanzada. Este dron puede transportar una carga de hasta 2kg, cubrir distancias de hasta 20 kilómetros, y operar a una altura máxima de 121 m sobre el nivel del suelo. Cuenta con una velocidad máxima de 57.6 km/h y puede soportar temperaturas que oscilan entre -17.7°C y 45°C (véase ficha técnica [24]).



Figura 5. Dron M2 de Matternet. Fuente: [24]

El sistema de entrega utilizado por Matternet está diseñado para evitar que el dron tenga que aterrizar físicamente. En lugar de eso, el dron permanece suspendido en el aire y utiliza un cable de descenso controlado para depositar el paquete en el punto de entrega. Matternet también ha desarrollado una estación de aterrizaje autónoma que permite que el dron realice operaciones completamente automatizadas, como cargar, cambiar baterías y recoger o entregar paquetes de forma segura. Este sistema se describe en detalle en el capítulo 3 de este proyecto, en la sección dedicada a la infraestructura.

A medida que los drones han comenzado a integrarse en aplicaciones sanitarias, surgen nuevas tecnologías como los eVTOL, que representan un paso adelante en la logística aérea sanitaria al ampliar significativamente las capacidades en términos de alcance, carga útil y flexibilidad operativa. Sin embargo, existe una notable diferencia en el nivel de madurez tecnológica entre ambas soluciones. Mientras que los drones han demostrado su viabilidad en aplicaciones concretas, los eVTOL se encuentran en una fase de desarrollo, pruebas y validación, centrada en cumplir con los estrictos requisitos regulatorios necesarios para su certificación y operación comercial.

Una diferencia clave entre ambos sistemas radica en las infraestructuras necesarias para su implementación. Mientras que los drones suelen operar de manera independiente sin necesidad de infraestructuras complejas, los eVTOL dependen de una red dedicada de vertipuertos. Estas infraestructuras deberán cumplir con rigurosos estándares de seguridad, eficiencia y sostenibilidad, además de integrarse de manera efectiva en entornos urbanos densamente poblados. No obstante, al igual que los eVTOL, los vertipuertos se encuentran en una etapa temprana de desarrollo y validación, siendo su diseño y funcionalidad elementos críticos para garantizar la viabilidad operativa de estas aeronaves.

La selección de un eVTOL para operar en un vertipuerto estará condicionada por los objetivos específicos de su uso. Según si la operación está destinada al transporte de pasajeros, mercancías o una combinación de ambos, las aeronaves ofrecerán capacidades distintas en términos de carga útil, autonomía y características técnicas. A su vez, estas especificaciones

influirán directamente en el diseño y configuración del vertipuerto, desde la capacidad de las plataformas de aterrizaje hasta los sistemas de carga eléctrica.

Actualmente existen varias aeronaves eVTOL en proceso de Certificación de Tipo con la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), diseñadas específicamente para operar en entornos urbanos y sobre áreas densamente pobladas. Entre los modelos destacados se encuentran:

1. **VoloCity.** El VoloCity es una aeronave totalmente eléctrica desarrollada por Volocopter para ofrecer transporte urbano de pasajeros. Tiene un diámetro de 11.3 metros, incluyendo el rotor, una autonomía de 20 km y capacidad para 2 pasajeros. Actualmente, la empresa cuenta con la Aprobación de Organización de Diseño (DOA) y de Producción (POA), lo que le permite llevar la aeronave desde la fase de prototipo hasta la producción en serie. Además, Volocopter está trabajando para lograr la Certificación de Tipo (TC), lo que permitirá la comercialización y entrega de VoloCity a sus clientes.
2. **Lilium Jet.** El Lilium Jet es un eVTOL con capacidad para 6 pasajeros diseñado para ofrecer transporte aéreo regional de alta velocidad. Tiene una autonomía de 175 km y una velocidad de crucero de 248 km/h. Esta aeronave no solo está diseñada para el transporte de pasajeros, sino que también ofrece configuraciones flexibles que le permiten adaptarse para el transporte de medicamentos, carga, y otras necesidades logísticas. Además, el tiempo de carga es de aproximadamente 45 minutos.

Sin embargo, en octubre de 2024, Lilium se declaró en quiebra tras no lograr asegurar los fondos necesarios para continuar sus operaciones. Este evento ha puesto en pausa el desarrollo del Lilium Jet y genera incertidumbre sobre su implementación futura en los mercados de Europa y Estados Unidos, para los cuales estaba planificada su certificación bajo los estándares de la EASA y la FAA. A pesar de este contratiempo, el Lilium Jet sigue siendo un ejemplo destacado de los avances tecnológicos en el diseño de aeronaves eVTOL.

3. **Joby S4.** La aeronave de Joby está diseñada para transportar a un piloto y cuatro pasajeros, con una velocidad máxima de 320 km/h y una autonomía de 160 km por carga completa. En febrero de 2024, la empresa firmó un acuerdo con la Autoridad de Carreteras y Transportes de Dubái (RTA) para iniciar un servicio de taxis aéreos en el emirato a principios de 2026. Como parte de este proyecto, Joby planifica la construcción de una red de cuatro vertipuertos estratégicamente ubicados. En noviembre de 2024, la compañía anunció el inicio de la construcción de su primer vertipuerto en el Aeropuerto Internacional de Dubái (DXB).

Joby también ha realizado con éxito vuelos de exhibición en ciudades clave como Nueva York y Japón, demostrando la viabilidad y el potencial de su aeronave en entornos urbanos. En términos de certificación, la empresa ha progresado significativamente en el proceso de obtención de la Certificación de Tipo (TC) con la FAA, habiendo completado tres de las cinco etapas necesarias. En diciembre de 2024, Joby anunció que había realizado con éxito sus primeras pruebas bajo la Autorización

de Inspección de Tipo (TIA), parte de la cuarta etapa del proceso de certificación. Estas pruebas evaluaron aspectos críticos de seguridad relacionados con factores humanos y se llevaron a cabo con pilotos de la FAA en un simulador de Joby. Paralelamente, la empresa también está trabajando para obtener la certificación en Europa a través de la EASA.

Además de su aeronave eléctrica a batería, Joby está explorando el uso de tecnología de hidrógeno a través de su filial H2FLY. En junio de 2024, un demostrador experimental basado en hidrógeno completó un vuelo récord de 842 km, mostrando el potencial del hidrógeno para vuelos regionales sin emisiones. Esta tecnología, aún en desarrollo, está proyectada para ser certificada y operativa a finales de esta década (2029-2030).

- 4. ALIA-250.** Esta aeronave, desarrollada por Beta Technologies, está diseñada tanto para transporte de carga como de pasajeros. Consta de una velocidad de crucero máxima de 250 km/h y capacidad para transportar hasta 5 pasajeros, lo que permitiría trasladar equipos médicos, órganos para trasplante o incluso un paciente con acompañante médico. Beta Technologies estima que el ALIA-250 puede alcanzar una autonomía de 400 km, aunque esta cifra aún no ha sido demostrada en pruebas reales. Además, esta empresa ha desarrollado una estación de carga rápida modular que puede configurarse fácilmente para adaptarse a áreas urbanas o rurales y recargar completamente sus baterías en menos de una hora.

En abril de 2024, el ALIA-250 demostró su capacidad operativa al completar con éxito vuelos de transición pilotados en el Aeropuerto Internacional de Plattsburgh, Nueva York. Estas pruebas validaron su capacidad para pasar de vuelo estacionario a vuelo de crucero y viceversa [26]. Actualmente, Beta Technologies avanza en el proceso de certificación de tipo bajo los estándares de la FAA, con el objetivo de obtener la aprobación para operaciones comerciales en 2025.

- 5. Midnight.** El Midnight, desarrollado por Archer Aviation, es una aeronave diseñada para transportar un piloto y cuatro pasajeros en trayectos cortos de entre 32 y 80 kilómetros, alcanzando velocidades de hasta 240 km/h. En agosto de 2024, Archer firmó un acuerdo con Future Flight Global para la venta de 116 unidades del Midnight por un valor de 580 millones de dólares, marcando un paso importante hacia la comercialización masiva de su tecnología. Además, la empresa ha establecido una colaboración con Kakao Mobility para lanzar un servicio de taxis aéreos en Corea del Sur a partir de 2026.

En cuanto a la certificación, Archer está actualmente avanzando en los procesos de Certificación de Producción y Certificación de Tipo con la FAA. Dentro de la Certificación de Tipo, la compañía ha logrado completar los Criterios Finales de Aeronavegabilidad y está trabajando en los Medios de Cumplimiento.

- 6. Integrity.** Crisalion Mobility, una empresa española destacada en el ámbito de la movilidad eléctrica avanzada, ha desarrollado el modelo Integrity, un eVTOL con

capacidad para un piloto y cinco pasajeros, que ofrece una autonomía de hasta 130 km y una velocidad de crucero de 180 km/h. Con una capacidad de carga útil de hasta 400 kg, el Integrity se adapta a diversas aplicaciones, desde transporte sanitario hasta movilidad urbana y regional, siendo altamente personalizable según las necesidades del cliente. En el ámbito de la certificación, Crisalion está trabajando para la aprobación de la EASA como Organización de Diseño Aprobada (DOA).

En junio de 2024, Crisalion firmó un acuerdo con iJet para la preventa de 10 aeronaves Integrity con el objetivo de establecer rutas que conecten puntos clave en Málaga y sus alrededores, como el Aeropuerto Internacional de Málaga-Costa del Sol. Posteriormente, en diciembre de 2024, Crisalion anunció un acuerdo de preventa con UrbanLink Air Mobility para la adquisición de 20 aeronaves Integrity. Este contrato tiene como objetivo introducir la tecnología eVTOL en mercados europeos como España e Italia.

Aunque hay un interés creciente en la autonomía, las certificaciones actuales y los estándares de seguridad establecidos por las autoridades reguladoras aún requieren la presencia de un piloto a bordo. A medida que se desarrollen nuevas normativas específicas para operaciones autónomas, es posible que se permita certificar aeronaves sin un piloto a bordo. Sin embargo, esto todavía está en desarrollo y requerirá demostrar un alto nivel de seguridad y confiabilidad en el sistema autónomo.

2.3.1 Cadena de frío

Un aspecto esencial en la logística sanitaria es la preservación de la cadena de frío, indispensable para el transporte de vacunas, muestras biológicas, medicamentos y otros productos sensibles a la temperatura. La integridad de estos productos depende de la capacidad de mantener temperaturas controladas durante todo el proceso de transporte, desde el punto de origen hasta su destino final. Tanto los drones como los eVTOL pueden equiparse con compartimentos térmicos diseñados para mantener las condiciones óptimas durante el vuelo. Estos sistemas pueden incluir soluciones activas, como unidades de refrigeración alimentadas por baterías, o métodos pasivos, como aislamiento térmico avanzado y geles refrigerantes.

2.3.1.1 Sistemas de refrigeración pasiva

Estos sistemas no requieren energía externa y utilizan materiales aislantes para mantener la temperatura deseada. Esta característica los hace ideales para integrarse en drones y eVTOL, ya que, al no requerir energía adicional, permite optimizar tanto el peso como la autonomía de estas aeronaves. A continuación, se describen las principales opciones disponibles:

- Contenedores UN3373: Diseñados específicamente para el transporte de muestras biológicas, estos contenedores cumplen con las regulaciones internacionales para materiales biológicos de categoría B. Esta categoría aplica a sustancias infecciosas que no representan un alto riesgo para la salud humana o animal en condiciones de transporte controladas.

El diseño de los contenedores UN3373 garantiza la protección del material transportado mediante un sistema de tres capas:

- Embalaje primario: Un recipiente estanco que contiene el material biológico.
 - Embalaje secundario: Proporciona una protección adicional para evitar derrames en caso de daño al embalaje primario.
 - Embalaje exterior: Un contenedor rígido y resistente a impactos, diseñado para garantizar la seguridad del transporte.
- Contenedores con aislamiento avanzado: Estos contenedores utilizan materiales de cambio de fase (PCM) que absorben o liberan calor a temperaturas específicas, permitiendo mantener una temperatura constante durante el transporte. Empresas como Va-Q-Tec ofrecen soluciones de este tipo, que están aprobadas para su uso en aviones comerciales y de carga.
- Geles refrigerantes: Consisten en paquetes que, una vez congelados, mantienen la temperatura interna del contenedor durante períodos prolongados. Son comunes en el transporte de productos farmacéuticos y pueden adaptarse a las dimensiones y capacidades de carga de drones y eVTOL.

2.3.1.2 Sistemas de refrigeración activa

Estos sistemas incorporan mecanismos de refrigeración que requieren de una fuente de energía para mantener las condiciones térmicas necesarias durante el transporte. A continuación, se describen las principales opciones disponibles:

- Unidades de refrigeración alimentadas por baterías: Estas unidades son sistemas autónomos de refrigeración que operan mediante baterías recargables, permitiendo mantener temperaturas controladas sin necesidad de fuentes de energía externas durante el transporte. Empresas como Envirotainer desarrollan este tipo de contenedores, diseñados principalmente para su uso en aviones comerciales y de carga.
- Contenedores refrigerados eléctricos: Estos contenedores incorporan sistemas de refrigeración alimentados por energía eléctrica. A diferencia de las unidades alimentadas por baterías, estos contenedores requieren una conexión constante a una fuente de energía, pero ofrecen una mayor capacidad de refrigeración y estabilidad térmica.

La elección entre sistemas pasivos y activos depende de factores como la duración del transporte, las condiciones ambientales y la sensibilidad térmica del producto. En el contexto de drones y eVTOL, es crucial considerar el peso y el consumo energético de estos sistemas para optimizar la eficiencia y autonomía de la aeronave.

Capítulo 3. MARCO NORMATIVO y REGULACIÓN

En este capítulo se analiza el marco normativo aplicable a las operaciones con drones y aeronaves VTOL tanto a nivel nacional como europeo. Se abordan los requisitos operacionales, las licencias y certificaciones necesarias, así como la infraestructura requerida para su implementación segura.

3.1 Marco Normativo Europeo

El marco regulador para la operación de drones y VTOL en Europa está liderado por la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA). Esta institución establece los estándares técnicos y operativos necesarios para garantizar una operación segura, integrada y sostenible en el espacio aéreo europeo. Dichos estándares incluyen la regulación de requisitos operativos, licencias, certificaciones y procedimientos técnicos que permiten una correcta implementación de estas tecnologías.

El Reglamento (UE) 2018/1139, también conocido como el Reglamento Básico de la EASA, establece los principios fundamentales para regular la seguridad de la aviación en Europa. En el contexto de la movilidad aérea urbana (UAM), esta regulación define los conceptos clave y delega a la EASA la responsabilidad de desarrollar normativas específicas para las nuevas tecnologías aeronáuticas, como los drones o VTOL y sus infraestructuras de apoyo. Este reglamento constituye la base para todas las normativas específicas de la EASA.

3.1.1 Requisitos Operacionales, Licencias y Certificaciones

La normativa europea clasifica las operaciones con drones y aeronaves VTOL en tres categorías principales, en función del nivel de riesgo y la complejidad de las actividades. Estas categorías están definidas en los artículos 4, 5 y 6 del Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, que establece los requisitos específicos en cuanto a condiciones operativas, evaluaciones de riesgo y autorizaciones. Complementariamente, las certificaciones de aeronaves y operadores están reguladas por el Reglamento Delegado (UE) 2019/945.

3.1.1.1 Categoría Abierta

Esta categoría aplica a operaciones de bajo riesgo, como vuelos recreativos o transporte ligero de mercancías en áreas no congestionadas. Es adecuada para operadores que no requieren certificaciones ni autorizaciones previas debido al bajo nivel de riesgo inherente a estas operaciones. Las principales condiciones operativas son:

- Peso máximo permitido: Las aeronaves deben pesar como máximo 25 kg.
- Restricción de vuelo: Las operaciones deben realizarse dentro de la línea de visión del piloto (VLOS) y no se permiten vuelos fuera de esta línea (BVLOS).
- Subcategorías: Se divide en tres subgrupos según el peso de la aeronave y la proximidad a personas no involucradas (A1, A2, A3).

3.1.1.2 Categoría Específica

Diseñada para operaciones de riesgo moderado, como vuelos BVLOS en áreas rurales, transporte sanitario de corta distancia o inspecciones industriales. Las principales condiciones operativas son:

- Evaluación de Riesgos Operacionales: Se exige una evaluación conforme al modelo SORA (Specific Operations Risk Assessment), para identificar y mitigar los posibles riesgos asociados a la operación. La evaluación SORA clasifica las operaciones en niveles SAIL (Specific Assurance and Integrity Level), desde I (riesgo más bajo) hasta VI (riesgo más alto). Este nivel determinará los requisitos de mitigación necesarios para garantizar la seguridad de la operación. Si tras la evaluación SORA se concluye que los riesgos operativos no pueden mitigarse adecuadamente con las medidas tradicionales, será necesaria una certificación adicional de diseño, producción y mantenimiento para garantizar que el dron cumple con los estándares de seguridad requeridos.
- Escenarios estándar (STS): En operaciones que se ajustan a las condiciones de un escenario estándar definido por la EASA, el operador puede presentar una declaración de conformidad en lugar de realizar una SORA completa, simplificando así el proceso regulador. Sin embargo, los vuelos BVLOS en áreas densamente pobladas no se contemplan en los escenarios estándar actuales.

Además, los operadores que deseen mayor flexibilidad y autonomía operativa tienen la posibilidad de solicitar un Light UAS Operator Certificate (LUC). Este certificado, otorgado por la autoridad competente, les permite autorizar sus propias operaciones dentro del alcance del LUC, eliminando la necesidad de solicitar autorizaciones específicas para cada operación.

Un ejemplo destacado en esta categoría es el dron Matternet M2, que en septiembre de 2024 obtuvo el Light UAS Operator Certificate para operaciones clasificadas en el nivel SAIL III. Esta certificación fue otorgada por la Oficina Federal de Aviación Civil de Suiza (FOCA), convirtiendo a Matternet en el primer operador en Suiza en recibir este tipo de autorización.

El nivel SAIL III está asociado con operaciones de riesgo medio-alto, como vuelos BVLOS en áreas urbanas o densamente pobladas. Gracias a la obtención del LUC, Matternet puede realizar este tipo de operaciones sin necesidad de solicitar permisos individuales para cada vuelo, lo que facilita significativamente sus actividades en Suiza.

Aunque el LUC fue emitido por la autoridad nacional de Suiza, está diseñado para ser reconocido en otros estados miembros de la EASA, permitiendo a los operadores llevar a cabo actividades en diferentes países europeos con una reducción significativa de la burocracia. Sin embargo, el LUC no elimina por completo la necesidad de coordinarse con las autoridades locales de cada país. Por ejemplo, antes de la obtención del LUC, Matternet ya contaba con una autorización específica de la Autoridad Federal de Aviación de Alemania (LBA) para realizar vuelos clasificados como SORA SAIL III en Berlín. Tras la obtención del LUC, Matternet amplió su autonomía operativa al adquirir la capacidad de autoautorizar operaciones dentro del Estado Federal de Berlín.

Otros drones destacados en esta categoría incluyen el Eiger de Rigitech y el P2 de Zipline, mencionados en el capítulo anterior.

3.1.1.3 Categoría Certificada

La Categoría Certificada está destinada a operaciones de alto riesgo que requieren un nivel de seguridad equiparable al de la aviación tripulada. Esta categoría abarca actividades como el transporte de pasajeros, mercancías peligrosas o vuelos en entornos densamente poblados. Las condiciones operativas y requisitos de certificación se detallan a continuación:

- **Certificación de aeronaves:** Las aeronaves deben cumplir con los estándares establecidos en el Reglamento Delegado (UE) 2019/945, lo que implica obtener una Certificación de Tipo (Type Certification). Además, los fabricantes pueden obtener un Certificado de Producción, que garantiza que las unidades fabricadas cumplen con el diseño aprobado. Por ejemplo, el Matternet M2 cuenta con la Certificación de Tipo emitida por la FAA y un Certificado de Producción, lo que permite emitir Certificados de Aeronavegabilidad (CofA) para cada dron producido. Estos certificados habilitan a las unidades para operar comercialmente sin inspecciones individuales por parte de la autoridad reguladora.

Para obtener una Certificación de Tipo, los fabricantes deben contar con la aprobación como Organización de Diseño Aprobada, otorgada por la EASA. Esta aprobación asegura que la organización dispone de las capacidades técnicas, recursos y procedimientos necesarios para desarrollar aeronaves que cumplan con los estándares regulatorios.

- **Certificación de operadores:** Los operadores en la Categoría Certificada deben contar con una certificación que garantice que disponen de los recursos, conocimientos y procesos necesarios para gestionar operaciones complejas y de alto riesgo. Los requisitos incluyen:
 - **Sistema de gestión:** Implementación de un sistema que contemple la gestión de riesgos operativos, la formación y cualificación del personal, y procedimientos documentados conforme al artículo ORO.GEN.200 del Reglamento (UE) 965/2012 [51].
 - **Manual de Operaciones:** Documento que detalle los procedimientos de vuelo, mantenimiento, gestión de emergencias y las medidas de mitigación de riesgos para las operaciones planificadas.
 - **Registros operativos:** Mantener registros precisos de las operaciones, las aeronaves y el personal, asegurando trazabilidad y cumplimiento normativo.
- **Registro de aeronaves y operadores:** Los VTOL como los drones certificados deben ser registrados conforme al Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947. Este registro incluye datos del fabricante, modelo y número de serie de la aeronave. Los operadores deberán registrarse en el Estado miembro en el que residan (personas físicas) o tengan su centro de actividad principal (personas jurídicas).
- **Certificación de pilotos:** Los pilotos que operan en esta categoría deben cumplir con estrictos requisitos de formación y certificación, equivalentes a los de la aviación

tripulada convencional. El Reglamento (UE) 1178/2011 establece los estándares de formación, licencias y aptitudes médicas para los pilotos. Los requisitos incluyen:

- **Licencia de Piloto:** Licencia que certifique competencias avanzadas en navegación aérea, comunicación con controladores de tráfico, procedimientos de emergencia y operaciones en entornos complejos. En el caso de los drones, es necesario contar con una licencia de piloto remoto.
- **Experiencia operativa:** Es obligatorio demostrar experiencia previa en operaciones con drones o aeronaves similares, respaldada por un registro de horas de vuelo certificadas.
- **Certificación médica:** En operaciones donde el piloto esté directamente involucrado, se debe cumplir con estándares médicos equivalentes a los exigidos en la aviación tripulada para garantizar su aptitud en condiciones de alto riesgo.

Las aeronaves VTOL suelen clasificarse en esta categoría debido al mayor nivel de riesgo asociado a sus operaciones, que se asemejan más a la aviación tripulada que a la operación de drones pequeños. En julio de 2019, en ausencia de especificaciones de certificación adecuadas para las aeronaves VTOL, la EASA publicó un conjunto de especificaciones técnicas en forma de un pliego de condiciones especiales para regular las características únicas de estas aeronaves, denominado SC-VTOL Issue 1 [46]. Este marco establece estándares de diseño, rendimiento y aeronavegabilidad necesarios para la emisión de un certificado de tipo.

Desde la publicación inicial del SC-VTOL Issue 1, la EASA ha continuado desarrollando un marco normativo para las aeronaves VTOL, adaptándose a los avances técnicos y las crecientes demandas operativas de la movilidad aérea urbana. Aunque este marco aún se encuentra en una etapa inicial, ha progresado mediante la introducción de documentos complementarios que refuerzan su implementación. La siguiente línea cronológica detalla las principales publicaciones de la EASA desde 2019 hasta 2024.

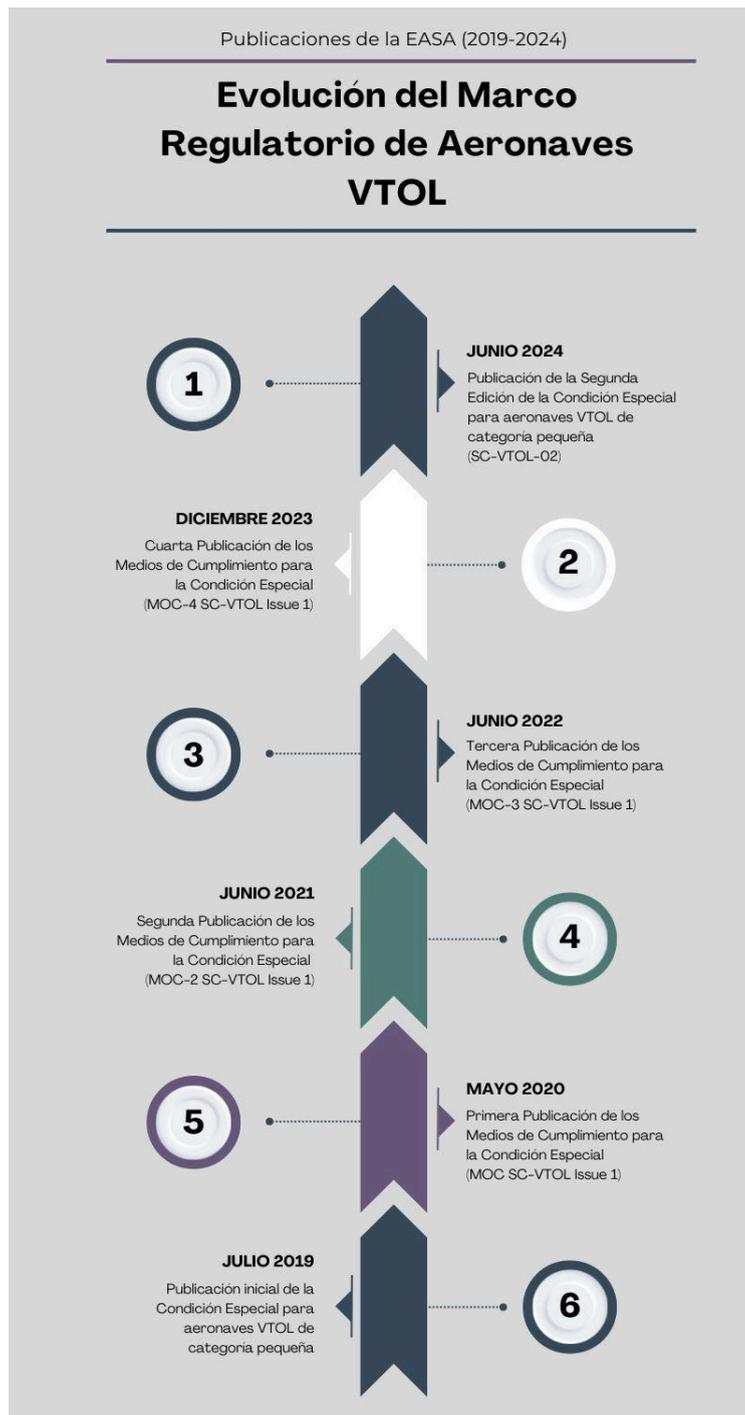


Figura 6. Línea Cronológica con las principales publicaciones de la EASA para aeronaves VTOL desde 2019 hasta 2024. Fuente: propia

Los Medios de Cumplimiento (Means of Compliance, MOC) son unos documentos que ofrecen una guía técnica específica para que fabricantes, operadores y otras partes interesadas puedan demostrar el cumplimiento de los requisitos normativos establecidos en las condiciones especiales.

En el contexto de las aeronaves VTOL, los MOC se desarrollaron como guías específicas para facilitar el cumplimiento de las condiciones especiales definidas en el SC-VTOL [47]. Cada MOC aborda un área específica del diseño y operación de las aeronaves:

- MOC-1 SC-VTOL Issue 1: Detalla los métodos para demostrar la estabilidad y el control de la aeronave, incluyendo pruebas de vuelo, simulaciones y análisis para validar su comportamiento en diversas condiciones operativas.
- MOC-2 SC-VTOL Issue 1: Proporciona directrices para garantizar la redundancia y la seguridad de los sistemas críticos, incluidos los de propulsión, para asegurar la capacidad de vuelo tras el fallo de un componente clave.
- MOC-3 SC-VTOL Issue 1: Establece requisitos para los sistemas electrónicos, aviónica y software, centrándose en la integridad funcional, la gestión de fallos y la seguridad ante interferencias externas.
- MOC-4 SC-VTOL Issue 1: Aborda los procedimientos operativos en entornos urbanos y periurbanos, considerando la densidad poblacional, la sostenibilidad y la gestión del espacio aéreo.

En 2024, la EASA publicó la segunda edición de las condiciones especiales para aeronaves VTOL (SC-VTOL Issue 2), que incorpora las lecciones aprendidas desde la implementación del marco inicial en 2019 [48].

Una de las principales razones detrás de las diferencias entre ambas ediciones es la naturaleza híbrida de las aeronaves VTOL, que comparten características tanto de aviones de ala fija como de helicópteros, lo que lleva a la necesidad de adoptar enfoques normativos de ambos marcos según corresponda. Durante el desarrollo del SC-VTOL Issue 1, muchos requisitos se inspiraron en las normativas para aeronaves de ala fija (CS-23). Esto incluyó referencias a conceptos como la Velocidad Máxima Operativa (VMO) y el Número de Mach Máximo Operativo (MMO), que son relevantes para aviones de esta categoría. A medida que se obtuvieron más datos operativos y técnicos, se observó que los VTOL comparten también una relación significativa con los helicópteros, por lo que se ajustaron algunos requisitos para alinearse mejor con las normativas CS-27 (helicópteros pequeños) y CS-29 (helicópteros grandes). Por ejemplo, se eliminaron las referencias a VMO/MMO en favor de parámetros estructurales más consistentes con los requisitos de helicópteros.

La siguiente tabla destaca las diferencias clave entre ambas ediciones, reflejando cómo se han ajustado los requisitos técnicos y normativos para responder a las características y necesidades de las aeronaves VTOL.

Aspecto	SC-VTOL Issue 1 (2019)	SC-VTOL Issue 2 (2024)
Masa Máxima de Despegue Certificada (MCTOM)	3 175 kg	5 700 kg

Configuración Máxima de Pasajeros (MPSC)	9 asientos	9 asientos (sin cambios)
Sistema de Interconexión de Cableado Eléctrico (EWIS)	No se aborda	Introducción del requisito VTOL.2517 para abordar riesgos en sistemas eléctricos de alta potencia.
Velocidad Máxima Operativa (VMO) y número de Mach Máximo Operativo (MMO)	El documento solo aplica a aeronaves con una VMO \leq 250 KCAS o un MMO \leq 0.6.	Se eliminan las referencias a VMO/MMO.
Regulaciones Asociadas	No menciona alineación con regulaciones específicas.	Incluye referencias al Reglamento de Ejecución (UE) 2024/1111 y estándares internacionales como Eurocae ED-155.
Enfoque en Sistemas Autónomos y pilotaje remoto	No se aborda	Introducción de directrices para mayor integración de autonomía.

Tabla 1. Comparación de los aspectos clave entre el SC-VTOL Issue 1 (2019) y SC-VTOL Issue 2 (2024). Fuente: Propia

Además, en la edición SC-VTOL Issue 2, se introdujeron modificaciones en la redacción de ciertos requisitos con el objetivo de lograr una mayor coherencia y alineación con los estándares de la FAA. Estas modificaciones no alteran el significado ni la intención original de los requisitos, pero buscan facilitar una interpretación común y reducir las posibles discrepancias entre ambos marcos normativos.

3.1.2 Infraestructura

La infraestructura necesaria para la operación de drones y aeronaves VTOL en el sector sanitario varía significativamente dependiendo de las capacidades, el alcance operativo y el entorno en el que se desplieguen estas tecnologías. Mientras que las aeronaves VTOL requieren instalaciones complejas como vertipuertos debido a sus características híbridas y su similitud con la aviación tripulada, los drones generalmente pueden operar con una infraestructura mucho más sencilla.

3.1.2.1 Infraestructura para Drones

En términos generales, los drones no necesitan infraestructuras específicas como pistas de aterrizaje o instalaciones complejas para su operación. Su capacidad de despegar y aterrizar verticalmente y su menor tamaño les permite operar desde ubicaciones existentes, como tejados, patios o áreas abiertas, siempre que cumplan con las normativas de seguridad y operativas establecidas. Sin embargo, para maximizar su eficiencia y garantizar operaciones sostenibles en el sector sanitario, ciertos elementos de infraestructura pueden ser necesarios, como:

- Estaciones de carga y almacenamiento de energía: Para drones eléctricos, es fundamental disponer de estaciones de carga adecuadas, especialmente en rutas de transporte frecuente.
- Áreas de despegue y aterrizaje: Aunque los drones pueden despegar desde espacios reducidos, en contextos urbanos o sanitarios, se requieren zonas dedicadas que sean seguras, accesibles y adecuadas para las operaciones, minimizando riesgos a terceros. Algunas empresas están combinando las estaciones de carga y almacenamiento de energía con las áreas de despegue y aterrizaje, creando instalaciones multifuncionales que simplifican la logística y aumentan la eficiencia operativa.
- Redes de comunicaciones y gestión de tráfico aéreo: A medida que los drones se integran en el espacio aéreo controlado, es esencial disponer de sistemas de comunicaciones y gestión para coordinar vuelos, especialmente en operaciones más complejas como las BVLOS.

Empresas líderes han comenzado a desarrollar estas infraestructuras de manera innovadora. Por ejemplo, Zipline ha desarrollado estaciones específicas para la carga y mantenimiento de sus drones, denominadas "nidos" o centros de distribución. Con la introducción de su nueva Plataforma 2 (P2), Zipline presentó estaciones de carga autónomas que se asemejan a una farola con un brazo adjunto, donde los drones pueden acoplarse y recargarse de manera autónoma (véase Figura 7). Estas estaciones tienen un diseño modular que permite escalar su configuración según los volúmenes de entrega, además de permitir una fácil integración en entornos urbanos o espacios reducidos.



Figura 7. Estación de carga autónoma de Zipline para su dron P2. Fuente: [52]

Otro ejemplo es Matternet, que ha desarrollado una estación autónoma diseñada no solo para el cambio de baterías, sino también para el envío y recepción de paquetes las 24 horas y el almacenamiento de un dron Matternet M2, todo sin necesidad de intervención humana en el sitio. Esta estación, con una altura de 2.9 metros y un ancho de 1.5 metros, está diseñada para almacenar hasta 6 paquetes y 6 baterías recargables, y está equipada con un sistema de control de temperatura que garantiza la seguridad de las baterías y los envíos más sensibles (véase Figura 8).



Figura 8. Estación de carga autónoma de Matternet para su dron M2. Fuente: [24]

Con respecto a la gestión del tráfico aéreo, tanto Matternet como Zipline cuentan con un software propietario aprobado por la FAA, sin embargo, el enfoque adoptado es ligeramente distinto. Matternet utiliza un software denominado Mission Control que permite a un único operador gestionar hasta 50 drones simultáneamente. Este sistema centralizado coordina las rutas de vuelo y supervisa la ejecución de las misiones para evitar conflictos en el espacio aéreo. Además, los drones están equipados con un software a bordo que traduce estas rutas planificadas en misiones ejecutables, monitorea la salud de la aeronave, reporta problemas en tiempo real y permite intervenciones remotas en vuelos autónomos.

Por otro lado, Zipline ha implementado un sistema en el que sus drones pueden comunicarse directamente entre sí, facilitando una descongestión táctica eficiente sin necesidad de intervención humana. Este sistema combina múltiples tecnologías de detección y gestión:

- Sensores de detección aérea: Los drones de Zipline están equipados con sensores que monitorean el espacio aéreo en 360 grados, con un alcance superior a una milla. Estos sensores funcionan de día o de noche y en todas las condiciones climáticas, permitiendo que los drones adapten sus rutas para evitar posibles peligros.
- Descongestión de flota: El software de gestión de flota de Zipline coordina automáticamente el tráfico de sus drones para evitar congestiones. Además, los drones pueden comunicarse entre sí directamente, facilitando una descongestión táctica eficiente sin intervención humana.
- Predicción meteorológica: Zipline emplea un sistema de predicción meteorológica de alta precisión para altitudes bajas, que permite a los drones modificar sus rutas automáticamente para evitar condiciones climáticas adversas.
- Mapas a bordo: Cada dron de Zipline lleva mapas a bordo que le permiten navegar espacios aéreos complejos y terrenos desafiantes, optimizando la velocidad y la eficiencia energética.

Sin embargo, a principios de noviembre de 2024, Matternet anunció la colaboración con ANRA Technologies para integrar soluciones avanzadas de Gestión del Tráfico de Sistemas No Tripulados (UTM). Este acuerdo busca transformar el enfoque centralizado de Matternet hacia un modelo más descentralizado y autónomo, que permita a sus drones comunicarse directamente entre sí y compartir datos en tiempo real, otorgándoles capacidades similares a las de Zipline.

3.1.2.2 Infraestructura para VTOL

El desarrollo de infraestructuras específicas, como los vertipuertos, es fundamental para la operación segura y eficiente de aeronaves VTOL. Según el SC-VTOL-01 de la EASA, un vertipuerto se define como "un área de tierra, agua o estructura destinada al aterrizaje y despegue de aeronaves con capacidad VTOL". Estas infraestructuras están diseñadas para satisfacer las demandas operativas tanto en entornos urbanos como periurbanos.

El diseño y la operación de un vertipuerto requiere abordar diversas áreas clave para garantizar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las operaciones:

- **Normativa y Regulaciones:** Cumplimiento con las normativas nacionales e internacionales, incluyendo las especificaciones técnicas de la EASA y las futuras enmiendas al Reglamento (UE) 139/2014.
- **Infraestructura Física:** Diseño y construcción de instalaciones adecuadas que incluyan áreas de aterrizaje y despegue (FATO), áreas de seguridad, zonas de estacionamiento y acceso para pasajeros o carga.
- **Seguridad Operacional:** Implementación de sistemas y procedimientos que garanticen operaciones seguras, incluyendo medidas de emergencia, gestión de riesgos y formación del personal.
- **Gestión del Espacio Aéreo:** Integración con los sistemas de gestión del tráfico aéreo existentes, garantizando la coordinación con otras aeronaves y evitando conflictos en el espacio aéreo.
- **Impacto Ambiental:** Evaluación y mitigación de los efectos ambientales, como el ruido, las emisiones y el impacto visual, asegurando la sostenibilidad y aceptación por parte de la comunidad.
- **Gestión de Energía:** Implementación de sistemas de suministro y almacenamiento de energía que puedan gestionar los picos de demanda energética y garantizar una operación ininterrumpida, especialmente relevante para aeronaves eléctricas.
- **Viabilidad Financiera:** Análisis económico que asegure la rentabilidad y sostenibilidad financiera del vertipuerto, incluyendo costos de construcción, operación y mantenimiento.
- **Coordinación de Operaciones:** Desarrollo de procedimientos operativos que coordinen eficientemente las actividades en el vertipuerto, incluyendo la gestión de pasajeros, carga, mantenimiento y servicios auxiliares.

La EASA ha tomado un papel proactivo en la creación de normativas y guías técnicas que permitan la integración segura de estas aeronaves en el espacio aéreo y la construcción de vertipuertos que faciliten sus operaciones. Para ello, ha desarrollado un plan en dos fases,

comenzando con las Especificaciones Técnicas Prototipo (PTS-VPT-DSN) y avanzando hacia la regulación formal y vinculante prevista en futuras enmiendas al Reglamento (UE) 139/2014.

3.1.2.2.1 El Plan de EASA: dos fases para Regular los Vertipuertos

En el primer trimestre de 2022, la EASA publicó el documento PTS-VPT-DSN (Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports). Este documento actúa como una guía no vinculante, es decir, no impone obligaciones legales a los Estados Miembros, pero proporciona una base para el diseño de vertipuertos que operarán con aeronaves VTOL (Vertical Take-Off and Landing) bajo las reglas de vuelo visual (VFR). El objetivo de estas especificaciones prototipo es ofrecer orientación técnica a los Estados Miembros para que puedan empezar a desarrollar sus propios marcos normativos nacionales.

Este documento abarca varios aspectos clave:

- Aplicabilidad y definiciones de vertipuertos.
- Características físicas de los vertipuertos, como dimensiones mínimas y áreas de maniobra.
- Entorno de obstáculos y requisitos de seguridad aérea.
- Ayudas visuales para facilitar las operaciones de despegue y aterrizaje.
- Vertipuertos alternativos en ruta, que podrían servir para aterrizajes de emergencia.

El PTS-VPT-DSN se alinea con normativas europeas e internacionales existentes (ADR, OACI) y toma como referencia las aeronaves VTOL certificadas en la categoría certificada. Las aeronaves en esta categoría deben cumplir con los requisitos de vuelo seguro continuado y aterrizaje (CSFL), lo que implica que, tras una falla, la aeronave debe ser capaz de continuar hacia su destino original o hacia un vertipuerto alternativo adecuado.

En este documento, se definen parámetros específicos para los procedimientos de despegue y aterrizaje vertical de aeronaves VTOL, tanto en términos de los valores mínimos como máximos permitidos. Además, se proporciona un conjunto predefinido de parámetros para el espacio aéreo, denominado "Volumen de Referencia Tipo 1", cuyo objetivo es estandarizar y guiar el diseño y las operaciones de los vertipuertos. Este volumen de referencia garantiza que las aeronaves VTOL puedan operar de forma segura dentro de los límites espaciales establecidos, cubriendo aspectos como las superficies de aproximación, el área de seguridad y los márgenes de maniobra.

El Volumen de Referencia Tipo 1 constituye una base sólida y estandarizada para estudiar la viabilidad de la instalación de un vertipuerto en diversas ubicaciones. Aunque no es de aplicación obligatoria en este momento, su utilización asegura que el diseño del vertipuerto esté alineado con las futuras normativas europeas, permitiendo evaluar con precisión las dimensiones físicas necesarias para garantizar la seguridad en las operaciones VTOL, incluso en entornos congestionados. Por lo tanto, el Volumen de Referencia Tipo 1 es, en la actualidad,

una guía robusta y práctica que servirá como base para llevar a cabo los estudios de viabilidad en el Capítulo 5 de este trabajo.

A continuación, se muestra un esquema con los parámetros clave necesarios para establecer las superficies de aproximación y despegue para aeronaves VTOL en un vertipuerto. En base a estos valores, es posible calcular un volumen tridimensional de seguridad que debe estar libre de obstáculos para garantizar las operaciones seguras.

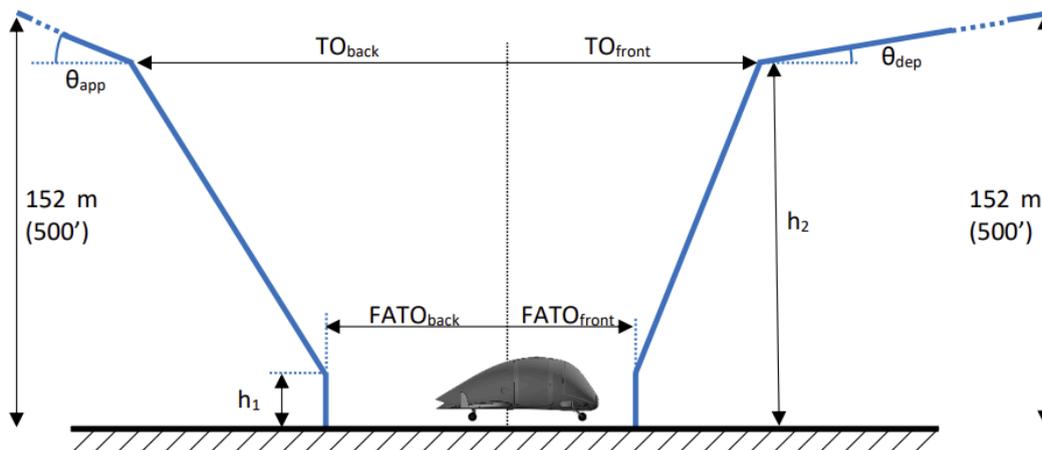


Figura 9. Parámetros genéricos asociados al procedimiento de despegue y aterrizaje vertical. Fuente: [25]

A continuación, se presenta una tabla con los valores predeterminados conforme el Volumen de Referencia Tipo 1.

Parameter	Reference volume Type 1
h_1	3 m (10')
h_2	30.5 m (100')
TO_{width}	3 D
TO_{front}	2 D
TO_{back}	2 D
$FATO_{width}$	2 D
$FATO_{front}$	1 D
$FATO_{back}$	1 D
θ_{app}	12.5 %
θ_{dep}	12.5 %

Tabla 2. Valores predeterminados conforme el Volumen de Referencia Tipo 1 (incluyendo SAs). Fuente: [25]

En la práctica, cualquier vertipuerto debe contener un Área de Seguridad (SA) que se extiende hacia afuera desde la periferia de la FATO para compensar posibles errores de maniobra, aunque ésta no necesita ser sólida. El valor de FATO que se muestra en la Tabla 2 considera también el espacio adicional correspondiente a la SA. Según el PTS-VPT-DSN, la SA debe extenderse una distancia de al menos 3 m o 0.25D, lo que sea mayor.

Los parámetros de TO y FATO se dan con respecto de D , donde D representa *el diámetro del círculo más pequeño que encierra la proyección de la aeronave VTOL en un plano horizontal, mientras la aeronave está en configuración de despegue o aterrizaje, con los rotores en funcionamiento* (véase Figura 10).

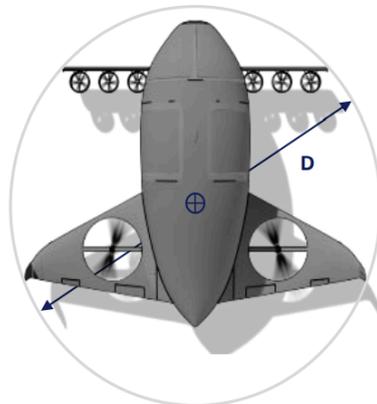


Figura 10. Dimensión "D". Fuente: [25]

Aunque el Volumen de Referencia Tipo 1 proporcione valores predefinidos, es importante considerar que estos valores pueden cambiar ligeramente en función del tipo de aeronave utilizada. Por ejemplo, las aeronaves VoloCity y Alia-250, presentadas en el capítulo 2, tienen un tamaño D de 11.3 m y 15.2m, respectivamente. En consecuencia, para operar estas aeronaves conforme el Volumen de Referencia Tipo 1, la FATO debería diseñarse como un cuadrado con lados equivalentes al doble de estas dimensiones.

Además de las dimensiones operativas, el diseño de un vertipuerto debe garantizar su identificación clara y precisa, especialmente en contextos críticos como el transporte sanitario. En este sentido, la EASA, a través del documento PTS-VPT-DSN, establece directrices para los marcajes de identificación en vertipuertos, diferenciando claramente aquellos destinados a hospitales (véase Figura 11). Los vertipuertos hospitalarios tienen un diseño distintivo que incluye una cruz blanca con una "V" roja dentro de un círculo azul, mientras que los vertipuertos genéricos utilizan una "V" blanca dentro de un círculo azul. Esta distinción es crucial para facilitar una identificación rápida en situaciones de emergencia médica.

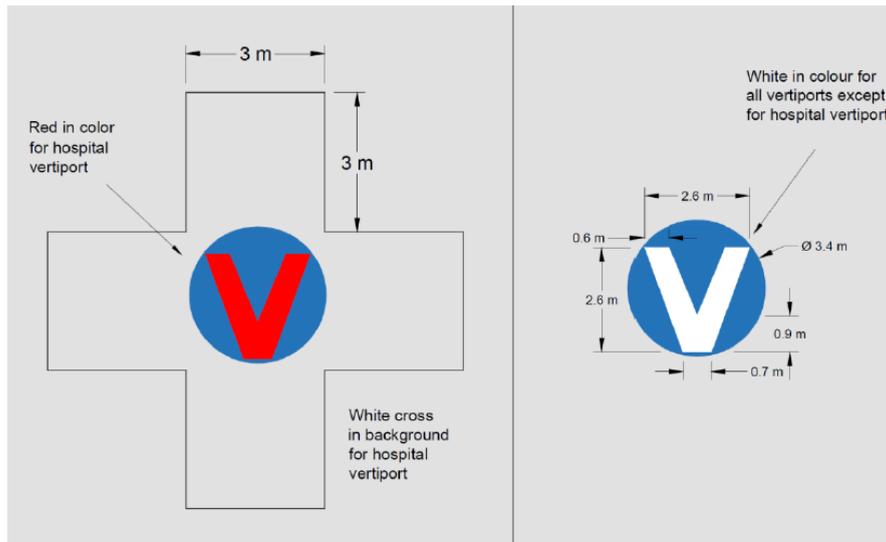


Figura 10. Marcaje de identificación de vertipuertos hospitalarios (izquierda) y vertipuertos genéricos (derecha). Fuente: [25]

Además de los marcajes visuales, la EASA también establece directrices específicas sobre los sistemas de iluminación para garantizar la visibilidad en condiciones de baja luz o durante operaciones nocturnas. En el caso de los vertipuertos hospitalarios, la cruz blanca debe estar iluminada mediante chevrones verdes en ángulo recto, situados en las cuatro esquinas internas de la cruz. Las características técnicas de estos chevrones son las que aparecen en la siguiente figura:

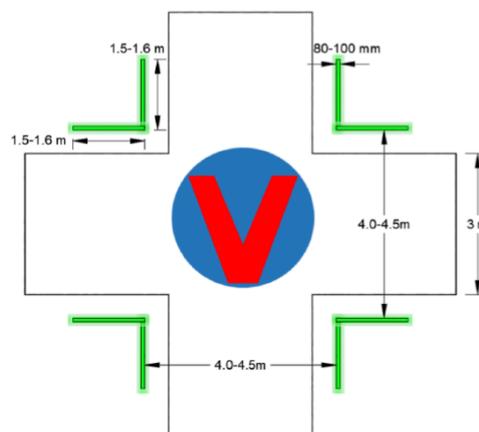


Figura 12. Disposición de chevrones verdes iluminados en los marcajes de vertipuertos hospitalarios. Fuente: [25]

En este proyecto se han incluido los aspectos más relevantes del documento PTS-VPT-DSN para el diseño de vertipuertos, especialmente aquellos relacionados con el sector sanitario. Sin embargo, este documento contiene más detalles técnicos y guías específicas que deben ser consultados para la implementación completa de estas infraestructuras.

Con esta base preliminar establecida, la segunda fase del plan de la EASA consiste en la actualización del Reglamento (UE) 139/2014, donde se incluirán las regulaciones completas y obligatorias para los vertipuertos. Estas regulaciones tendrán carácter vinculante en toda la Unión Europea, asegurando la estandarización de estas infraestructuras en toda Europa.

3.2 Marco Normativo Nacional: España

En España, la regulación de drones y aeronaves VTOL recae principalmente en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), que actúa en coordinación con las directrices europeas establecidas por la EASA. Aunque las aeronaves VTOL aún no cuentan con un marco normativo consolidado a nivel nacional, AESA participa activamente en el desarrollo de estándares europeos como parte del Vertiport Task Force (VPTTF). Este grupo de trabajo, que incluye a fabricantes como Volocopter y Airbus, junto con empresas tecnológicas y prestadores de servicios de navegación aérea, busca establecer las bases para la certificación y operación de vertipuertos en Europa.

El marco regulador actual para drones se establece en el Real Decreto 1036/2017, que define las condiciones de uso del espacio aéreo por parte de las aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS) y complementa las disposiciones del Reglamento SERA. Los aspectos más destacados se incluyen:

- **Alturas y espacio aéreo permitidos:** Los drones pueden operar a una altitud máxima de 120 metros sobre el terreno o sobre obstáculos dentro de un radio de 150 metros, salvo excepciones autorizadas.
- **Vuelos nocturnos:** Permitidos únicamente bajo la elaboración de un estudio aeronáutico de seguridad que garantice la viabilidad de la operación.
- **Vuelos BVLOS:** Requieren sistemas certificados para detectar y evitar otras aeronaves. En caso de no disponer de dichos sistemas, la operación debe realizarse en espacio aéreo temporalmente segregado (TSA).
- **Operaciones en zonas urbanas y habitadas:** Estas operaciones requieren un estudio aeronáutico de seguridad que evalúe posibles fallos de la aeronave y sus sistemas, incluyendo la estación de pilotaje remoto y el enlace de mando y control. También se requiere una autorización previa por parte de la AESA.
- **Distancias mínimas respecto a aeropuertos y aeródromos:** Las operaciones deben mantenerse a al menos 8 kilómetros de cualquier aeropuerto o aeródromo, salvo acuerdo con los gestores aeroportuarios y de tránsito aéreo.

El Real Decreto también establece requisitos técnicos específicos para los drones, incluyendo:

- **Comunicación bidireccional:** Los drones deben estar equipados con sistemas que permitan comunicación constante con estaciones aeronáuticas.

- **Dispositivos de seguridad:** Sistemas para la terminación segura del vuelo, como dispositivos de limitación de energía del impacto, son obligatorios para vuelos en zonas habitadas.
- **Transpondedor Modo S:** Obligatorio para operaciones en espacio aéreo controlado, salvo para aeronaves VLOS con una masa al despegue inferior a 25 kg.
- **Iluminación y visibilidad:** Los drones deben incorporar luces y pintura adecuada para garantizar su visibilidad durante las operaciones.

Por ejemplo, el dron Eiger de Rigittech, cuenta con unas capacidades técnicas que cumplen con los requisitos establecidos en el Real Decreto 1036/2017, posicionándolo como una solución segura y fiable para operaciones en entornos urbanos. Este dron incorpora sistemas de seguridad, como el Quadchute y el paracaídas balístico, que actúan como medidas de mitigación para prevenir daños en caso de fallos técnicos, asegurando una terminación segura del vuelo incluso en entornos sensibles. Además, está equipado con un sistema de detección y evasión que integra ADS-B In/Out y FLARM, permitiendo la identificación y evasión automática de otras aeronaves en el espacio aéreo compartido. Este sistema, combinado con su comunicación bidireccional mediante redes 3G/4G y satélite, asegura un enlace constante de mando y control, incluso durante operaciones BVLOS. Asimismo, el Eiger cuenta con iluminación y un sistema de identificación remota (Remote ID) que incrementan su visibilidad.

El caso del dron Eiger ejemplifica cómo las normativas actuales permiten abordar operaciones con drones en entornos urbanos de forma segura y eficiente. Sin embargo, las aeronaves VTOL, al ser una tecnología emergente con características híbridas entre drones y aviación tripulada, presentan desafíos adicionales debido a la ausencia de un marco normativo específico consolidado en España. En este contexto, la regulación de vertipuertos, esenciales para estas aeronaves, aún se encuentra en desarrollo. El proceso previsto para su autorización incluye cuatro fases principales:

1. Compatibilidad de espacio aéreo: Evaluar si las operaciones del vertipuerto pueden integrarse sin conflictos con otras actividades aéreas.
2. Trámite ambiental: Analizar el impacto del vertipuerto en el entorno, incluyendo ruido, emisiones y otros factores ambientales.
3. Autorización de construcción o establecimiento: Aprobar planos, especificaciones técnicas y localización del vertipuerto.
4. Apertura al tráfico: Validar la infraestructura mediante inspecciones y pruebas de seguridad.

Aunque no se dispone de vertipuertos plenamente operativos, se están desarrollando iniciativas en el ámbito de los VTOL. Por ejemplo, durante la primera jornada del congreso Global Mobility Call celebrado en Madrid en noviembre de 2024, Aena anunció que planea realizar vuelos demostrativos con aeronaves VTOL entre 2025 y 2026 en rutas como Málaga-Granada y Palma de Mallorca-Menorca, en colaboración con Volocopter. Estas pruebas buscan validar procedimientos y establecer estándares para este tipo de operaciones en España.

En el ámbito sanitario, los proyectos desarrollados en España se han centrado mayoritariamente en drones convencionales y no en aeronaves VTOL. Estas iniciativas han incluido pruebas experimentales para el transporte de material sanitario, medicamentos, muestras biológicas y equipamiento médico.

Capítulo 4. EVALUACIÓN DE IMPACTO

La integración de drones y aeronaves VTOL en el sector sanitario representa una revolución en la logística de transporte, con implicaciones significativas en términos de eficiencia, costo y sostenibilidad. Este capítulo evalúa el impacto de estas tecnologías, analizando su impacto social, su viabilidad económica y su contribución a la sostenibilidad ambiental. Además, se compara el desempeño de los VTOL con helicópteros en operaciones sanitarias, destacando su estabilidad y eficiencia operativa.

4.1 Impacto social

La introducción de drones y aeronaves VTOL en el sector sanitario representa un cambio significativo no solo en la logística y las operaciones de emergencia, sino también en las dinámicas sociales que rodean la prestación de servicios de salud. Este apartado expone cómo estas tecnologías afectan a la sociedad en términos de accesibilidad, equidad, percepción pública y aceptación, abordando tanto los beneficios como los desafíos asociados a su adopción.

Una de las contribuciones sociales más significativas de los drones y VTOL es su capacidad para mejorar el acceso a servicios esenciales. En zonas urbanas densamente pobladas y regiones rurales de difícil acceso, estas tecnologías tienen el potencial de revolucionar la entrega de medicamentos, muestras biológicas y equipos médicos. Los drones, con su diseño compacto y maniobrabilidad, son ideales para operaciones logísticas de corto alcance, mientras que los eVTOL, gracias a su mayor autonomía y capacidad de carga, ofrecen una solución robusta para cubrir largas distancias y transportar mayores volúmenes, ampliando significativamente la cobertura de los servicios de salud.

Además de mejorar el acceso a servicios esenciales, estas tecnologías ofrecen una oportunidad para optimizar procesos logísticos en el sistema sanitario. Al automatizar operaciones como el transporte de suministros médicos, los drones y VTOL no solo permiten que el personal sanitario centre sus esfuerzos en la atención directa al paciente, sino que también mejoran la capacidad del sistema de salud para responder a situaciones de alta demanda, como emergencias masivas o pandemias.

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías puede generar inquietudes en comunidades y profesionales de la salud relacionadas con la seguridad y el uso adecuado de estas aeronaves. Por ejemplo, en 2019, se registraron dos incidentes significativos con drones de Matternet operados por Swiss Post en Suiza. El primer incidente ocurrió en enero, cuando un dron realizó un aterrizaje de emergencia en el lago de Zúrich debido a una falla en el GPS. Posteriormente, en mayo, otro dron sufrió una caída cerca de un grupo de niños después de que su paracaídas de emergencia no se desplegara correctamente debido a que la cuerda se cortó al entrar en contacto con las hélices. Afortunadamente, no hubo heridos en ninguno de los casos, pero

estos eventos llevaron a la suspensión temporal del servicio y generaron preocupaciones sobre la fiabilidad de estas aeronaves.

En respuesta a estos incidentes, Matternet implementó mejoras en sus drones para reforzar la seguridad. Las cuerdas del paracaídas se reforzaron con trenzado metálico para evitar que se corten durante el despliegue y se añadió una cuerda de más para proporcionar mayor redundancia. Además, se aumentó el volumen de las señales acústicas emitidas por el dron durante situaciones de emergencia para alertar a las personas en tierra. Estas mejoras fueron evaluadas y aprobadas por las autoridades competentes, lo que permitió la reanudación de las operaciones en enero de 2020.

Además de la seguridad operacional, es esencial garantizar la protección del contenido transportado. Drones como los desarrollados por Matternet y Rigitech están equipados con compartimientos de carga seguros, diseñados específicamente para proteger el contenido durante el vuelo. Además, las estaciones desarrolladas por Matternet incorporan tecnologías de identificación mediante tarjetas RFID, asegurando que solo el personal autorizado pueda acceder a los paquetes.

El uso de drones en entornos sanitarios también puede generar inquietudes sobre su posible uso secundario para actividades no relacionadas, como la vigilancia no deseada. Aunque los drones utilizados en logística médica generalmente no están equipados con cámaras para grabar o transmitir imágenes, la transparencia en las operaciones es fundamental. Comunicar de manera proactiva los propósitos y limitaciones técnicas de estas tecnologías puede disipar temores y reforzar su aceptación.

La ciberseguridad es otro pilar esencial para garantizar la confianza social en estas tecnologías. Dado que tanto los drones como los VTOL dependen de la conectividad y el software para su funcionamiento, deben implementarse medidas robustas, como:

- Protección contra hackeos: Software resistente que impida intentos de acceso no autorizado o el control remoto de las aeronaves.
- Actualizaciones periódicas: Programas de mantenimiento que incluyan la actualización regular de software para mitigar vulnerabilidades y mejorar la seguridad.
- Sistemas de recuperación: Protocolos de emergencia que permitan a las aeronaves regresar a una zona segura en caso de pérdida de conexión o interferencias.

Para fomentar la aceptación social, es crucial adoptar medidas que refuercen la confianza de las comunidades:

- Transparencia y comunicación: Informar claramente sobre las medidas de seguridad implementadas y cómo se garantiza la confidencialidad de los datos y materiales transportados.
- Pruebas piloto supervisadas: Realizar demostraciones públicas que permitan a las comunidades observar directamente los beneficios y la seguridad de estas tecnologías.
- Colaboración con autoridades: Trabajar estrechamente con reguladores y organismos de certificación para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad y confidencialidad.

- Demostración de beneficios tangibles: Resaltar casos concretos en los que estas tecnologías hayan contribuido a la reducción de los tiempos de respuesta y a la mejora de los servicios sanitarios.

En definitiva, la adopción de drones y VTOL en el sector sanitario no solo promete transformar las operaciones logísticas, sino que también establece un nuevo estándar para la equidad y la calidad en la atención médica. Con la implementación de marcos regulatorios sólidos y la superación de barreras sociales y técnicas, estas tecnologías tienen el potencial de convertirse en pilares esenciales del sistema sanitario del futuro.

4.2 Impacto económico

La implementación de drones y aeronaves VTOL en el sector sanitario no solo representa una mejora en términos operativos, sino que también ofrece oportunidades para optimizar costos y generar valor económico a largo plazo. Este apartado analiza los costos asociados a estas tecnologías y los compara con los métodos tradicionales, destacando los beneficios económicos que ofrecen.

Una de las principales ventajas de los drones y VTOL es su bajo costo operativo en comparación con otros medios de transporte aéreo, como los helicópteros. Factores clave que contribuyen a esta reducción incluyen:

- Energía eléctrica frente a combustible fósil: La mayoría de los drones y eVTOL utilizan propulsión eléctrica, lo que reduce significativamente los costos energéticos frente al consumo de combustible.
- Mantenimiento simplificado: Estas aeronaves tienen menos componentes mecánicos complejos en comparación con helicópteros o aviones convencionales, lo que reduce los costos y tiempos de mantenimiento.
- Optimización del personal: En el caso de los drones, un único operador puede gestionar múltiples drones de manera remota, reduciendo la necesidad de personal especializado. Sin embargo, en el caso de los VTOL, las primeras operaciones podrían requerir pilotos dedicados. A medida que se adopten sistemas de pilotaje remoto o autónomo, se espera una mayor optimización en este aspecto.

El costo de adquisición de aeronaves eVTOL varía significativamente entre los diferentes fabricantes, con precios que oscilan desde 128,000 dólares hasta más de 5 millones de dólares. Estas diferencias están influenciadas por factores como el propósito de la aeronave, su diseño, las tecnologías integradas, el mercado objetivo y el estado de desarrollo. Algunas empresas han optado por no divulgar públicamente sus precios debido a la complejidad de los acuerdos comerciales o a las etapas iniciales de desarrollo. Sin embargo, se pueden destacar algunos ejemplos relevantes:

1. **Volocopter VoloCity:** Estimado en aproximadamente 300000 euros por unidad, según información de 2020.

2. **Archer Midnight:** En 2024, Archer Aviation firmó un acuerdo con Future Flight Global para la compra de 116 unidades por un total de 580 millones de dólares, lo que implica un costo unitario de 5 millones de dólares.
3. **Jetson ONE:** Aunque el Jetson ONE no está diseñado específicamente para el sector sanitario, su precio público de 128000 dólares muestra cómo algunas aeronaves eVTOL personales están comenzando a entrar en mercados más accesibles. Este modelo, disponible para compra directa en la página web de Jetson, refleja una categoría distinta, pero relevante para entender el rango de precios en el mercado eVTOL.
4. **Joby S4:** Aunque Joby Aviation no ha publicado un precio oficial para su eVTOL, algunas estimaciones sugieren un costo de aproximadamente 1 millón de dólares por unidad, basado en análisis de la industria y acuerdos previos con entidades como Toyota, que han invertido en su desarrollo.

Estas cifras reflejan una amplia diversidad en los costos asociados a las aeronaves eVTOL, desde opciones personales más asequibles hasta soluciones de transporte avanzado diseñadas para operaciones urbanas y comerciales. Aeronaves como las de Joby y Archer, diseñadas para transporte aéreo comercial, integran tecnologías avanzadas como sistemas redundantes, propulsión eléctrica optimizada y autonomía extendida. Estas características no solo incrementan sus costos de producción, sino que también los someten a estrictos estándares regulatorios, lo que eleva los costos asociados a certificación y desarrollo. En contraste, aeronaves como el VoloCity de Volocopter o el Jetson One presentan diseños más simples y limitaciones en su alcance y capacidad, lo que les permite reducir costos operativos y de fabricación.

Otro factor clave es la producción y escalabilidad. Los precios actuales de aeronaves como las de Joby y Archer reflejan las fases iniciales de desarrollo, donde los prototipos y las pruebas de certificación dominan los costos. Se espera que los precios unitarios disminuyan con el inicio de la producción en masa, lo que podría cerrar la brecha entre estas aeronaves y modelos más económicos como el VoloCity.

En comparación, los helicópteros empleados actualmente en operaciones sanitarias, como el Airbus H135 y el H145, tienen costos considerablemente más altos. Por ejemplo, el H135, utilizado en Cataluña, cuesta entre 5,7 y 6,5 millones de dólares por unidad, mientras que el H145, empleado por el SUMMA 112 de Madrid, tiene un precio estimado de entre 9 y 10 millones de dólares.

A continuación, se detallan los costos operativos para ambos helicópteros:

Airbus H145

- **Consumo de combustible:** Este helicóptero consume entre 180 y 200 litros de combustible Jet-A por hora de vuelo, lo que representa un costo de entre \$600 y \$800.
- **Mantenimiento programado:** Incluye inspecciones regulares, reemplazo de componentes y revisiones generales. El costo de este tipo de mantenimiento varía según la antigüedad de la aeronave, las horas de vuelo acumuladas y el entorno

operativo. En promedio, el mantenimiento programado del H145 puede costar entre \$300000 y \$500000 al año.

- **Mantenimiento no programado:** Reparaciones o reemplazos de componentes debido a fallos imprevistos o desgaste. Estos costos son menos predecibles, pero generalmente se estiman en un rango de \$50000 a \$100000 al año.

Airbus H135

- **Consumo de combustible:** Este modelo, equipado con motores Pratt & Whitney PW206B3, consume aproximadamente 140 a 150 litros de combustible por hora. Dependiendo del precio del combustible en la región, esto representa un costo de entre 400 y 600 dólares por hora de vuelo.
- **Mantenimiento:** El H135 es reconocido por sus bajos costos de mantenimiento dentro de su categoría. Con intervalos de inspección prolongados—inspecciones intermedias cada 500 horas de vuelo y periódicas cada 1000 horas o tres años—los costos anuales de mantenimiento oscilan entre 200000 y 400000 dólares, incluyendo inspecciones, reemplazo de piezas y mano de obra.

Además, ambos modelos comparten costos asociados a:

- **Entrenamiento y certificación:** Los pilotos y miembros de la tripulación deben someterse a entrenamientos y certificaciones regulares para mantener sus cualificaciones. Los costos de formación, que incluyen sesiones en simulador y programas de entrenamiento recurrente, pueden oscilar entre \$20000 y \$50000 al año.
- **Cumplimiento normativo:** La obtención de certificaciones y la realización de auditorías e inspecciones implican costos adicionales.
 - Tarifas de Certificación: Obtener y mantener las certificaciones necesarias para operar el H145 puede costar entre 5000 y 20000 dólares.
 - Costos de Auditoría e Inspección: Las auditorías e inspecciones regulares realizadas por autoridades de aviación u organizaciones independientes son obligatorias para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad. Estos costos pueden variar considerablemente, pero generalmente se estiman entre \$10000 y \$30000 por año.
- **Depreciación:** El valor del helicóptero disminuye con el tiempo debido a factores como la antigüedad, el uso y la demanda del mercado. Generalmente, la depreciación se calcula como un porcentaje del valor de la aeronave y puede oscilar entre un 5% y un 10% anual.

Además de los factores mencionados previamente, los eVTOL destacan por su diseño simplificado en comparación con los helicópteros, lo que contribuye significativamente a su menor costo inicial y operativo. A continuación, se analizan los elementos mecánicos que los eVTOL eliminan o simplifican, y cómo estas innovaciones impactan positivamente en su mantenimiento, peso y costos generales.

1. **Sistema de transmisión:** Los helicópteros utilizan sistemas de transmisión complejos que incluyen ejes, engranajes y cajas reductoras para transferir la potencia desde el

motor a los rotores principales y de cola. En cambio, los eVTOL suelen emplear motores eléctricos directos para cada rotor, eliminando la necesidad de sistemas de transmisión. Este diseño no solo reduce el peso y los costos de mantenimiento asociados, sino que también mejora la estabilidad al eliminar posibles fuentes de vibración mecánica.

2. **Rotor de cola:** Los helicópteros convencionales requieren un rotor de cola o un sistema equivalente para contrarrestar el torque generado por el rotor principal. Este componente añade complejidad mecánica y más puntos de mantenimiento. Los eVTOL, al utilizar configuraciones de múltiples rotores, distribuyen la fuerza de propulsión de manera equilibrada y eliminan el torque, por lo que eliminan la necesidad de un rotor de cola además de conseguir un vuelo más estable y controlado.
3. **Motores eléctricos frente a motores de combustión interna:** Los helicópteros utilizan motores de turbina o pistones, que son sistemas mecánicos complejos con numerosas piezas móviles, altas temperaturas y un desgaste significativo. Estos motores requieren mantenimientos frecuentes y costosos. Por el contrario, los eVTOL emplean motores eléctricos, que tienen menos piezas móviles y generan menos calor, lo que reduce significativamente los costos de fabricación y de mantenimiento.
4. **Control de vuelo mecánico frente a control electrónico:** Los helicópteros suelen incorporar sistemas hidráulicos y mecánicos para los controles de vuelo, lo que añade complejidad y costos de mantenimiento. En cambio, los eVTOL suelen utilizar sistemas de control completamente electrónicos (fly-by-wire), gestionados por software avanzado que regula la velocidad y potencia de los rotores individuales, simplificando su operación y reduciendo la necesidad de componentes mecánicos.
5. **Rotores rígidos frente a rotores articulados:** Los rotores principales de los helicópteros a menudo son articulados, con sistemas mecánicos que ajustan el ángulo de ataque de cada pala durante su rotación. Los eVTOL, en cambio, emplean rotores rígidos y de paso fijo, lo que elimina la necesidad de mecanismos de ajuste continuo. En su lugar, la maniobrabilidad se logra ajustando la velocidad de los motores eléctricos.
6. **Componentes redundantes:** Para garantizar la seguridad, los helicópteros requieren redundancia en subsistemas críticos, como la transmisión o los rotores, lo que incrementa su costo y complejidad. Aunque los eVTOL también deben cumplir con estándares de redundancia, la distribución de múltiples motores y rotores permite simplificar esta tarea. Por ejemplo, si un rotor falla, los demás pueden compensar sin necesidad de componentes mecánicos adicionales.
7. **Requisitos de combustible frente a almacenamiento eléctrico:** Los helicópteros necesitan sistemas de combustible que incluyen tanques, bombas y líneas de alimentación. En contraste, los eVTOL operan con baterías eléctricas, eliminando la necesidad de estos sistemas. Esto no solo simplifica el diseño, sino que también reduce los riesgos de fugas o incendios asociados al combustible. Sin embargo, es importante destacar que las baterías experimentan degradación con el tiempo por lo que requerirán de un reemplazo periódico, especialmente en operaciones intensivas.

Además de los costos operativos y de adquisición de eVTOL, es fundamental considerar los costos asociados a la construcción y mantenimiento de vertipuertos. Los costos de

construcción de vertipuertos varían significativamente en función de su tamaño y capacidad, como se detalla en la siguiente imagen:

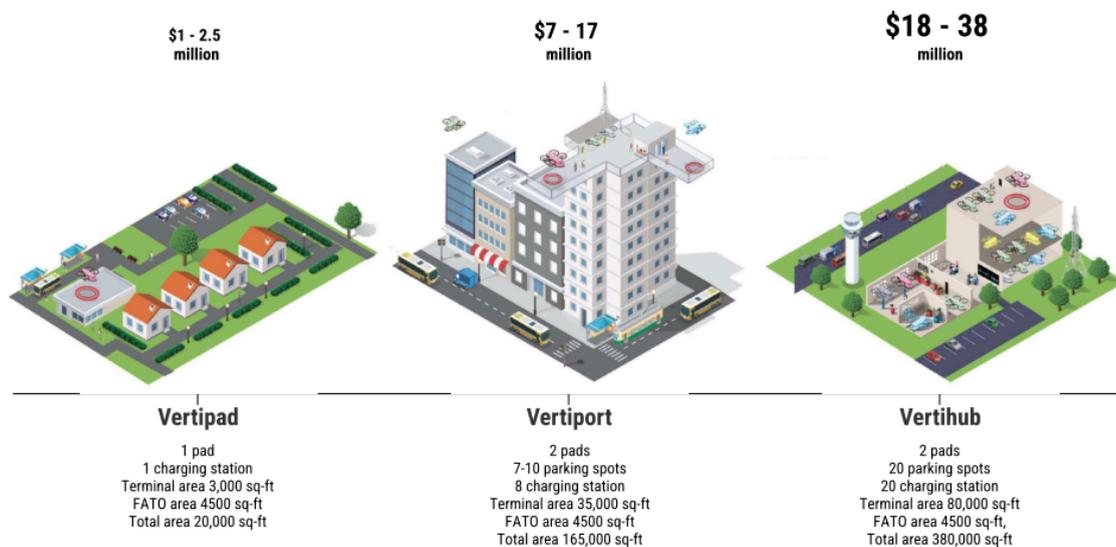


Figura 13. Costos estimados de construcción de vertipuertos según tamaño y capacidad. Fuente: [104]

Aunque muchas empresas no revelan públicamente los costos específicos de los drones utilizados en operaciones logísticas o sanitarias, se puede inferir un rango estimado de precios basado en la información disponible de la industria. Por ejemplo, los drones comerciales avanzados, diseñados para aplicaciones generales como cartografía, inspección y entrega de pequeñas cargas, suelen oscilar entre 10000€ y 30000€ por unidad. Por lo tanto, para una flota de 50 a 100 drones, la inversión inicial puede variar entre 500000 y 3 millones de euros. No obstante, es importante destacar que los drones sanitarios, al incorporar especificaciones más avanzadas y sistemas especializados, probablemente se posicionen en un rango superior dentro de esta escala.

Además de los costos iniciales, el mantenimiento anual de estos drones representa aproximadamente el 10-20% de su precio de adquisición, es decir, entre 1000 y 6000 euros por unidad al año. Estos costos incluyen inspecciones regulares, reparaciones y ajustes técnicos necesarios para mantener la flota en óptimas condiciones operativas. También deben considerarse las actualizaciones regulares de software y hardware, así como el eventual reemplazo de drones envejecidos. Estas gestiones del ciclo de vida pueden agregar un 5-10% adicional al presupuesto operativo anual.

El reemplazo de baterías es otro costo relevante en la operación de drones. Empresas como Matternet, Zipline y Rigittech emplean baterías de iones de litio (Li-ion) en operaciones logísticas y sanitarias debido a su alta densidad energética, peso ligero y eficiencia en la recarga. Estos drones están diseñados para operar con una sola batería principal por vuelo.

La vida útil de las baterías se mide en ciclos de carga y descarga. Dependiendo del tipo de batería y las condiciones operativas, estas baterías suelen tener una capacidad para realizar

entre 800 y 1,500 ciclos antes de requerir un reemplazo. En flotas con operaciones intensivas diarias, la necesidad de reemplazo tiende a ser más frecuente.

Dado que las empresas no suelen publicar directamente el precio de las baterías empleadas en sus drones, se ha optado por recopilar información sobre las especificaciones técnicas de estas y buscar ejemplos de baterías similares disponibles en el mercado. Esto permite ofrecer una estimación realista del costo de reemplazo de estas baterías. Dependiendo del tamaño del dron y sus requisitos de potencia, dicho costo puede situarse generalmente en un rango de 300€ a 1000€ por unidad. A continuación, se presentan unos ejemplos.

Ejemplo 1: Dron Eiger de Rigitech

El dron Eiger, diseñado por Rigitech, emplea una batería con las siguientes especificaciones:

- Capacidad: 22000 mAh
- Configuración: 12S (44.4V)
- Energía: 976,8 Wh
- Tipo: Batería de iones de litio

Un ejemplo de batería compatible con estas especificaciones es la Tattu Plus 12S 44.4V 22000mAh 25C LiPo Battery [73], que ofrece las siguientes características:

- Capacidad: 22000 mAh
- Voltaje: 44,4V
- Peso: 6300 gramos
- Dimensiones: 117 × 174 × 238 mm
- Precio: 1022,93 €

Ejemplo 2: Dron M2 de Matternet

El dron M2 de Matternet, utiliza una batería de menor capacidad en comparación con el Eiger:

- Energía: 756 Wh
- Consumo de corriente: 30-40 A
- Tipo: Batería de iones de litio

Un ejemplo de batería compatible con estas especificaciones es la Tattu 6S 22.2V 16000mAh 30C LiPo Battery [74], que cuenta con las siguientes características:

- Capacidad: 16000 mAh
- Voltaje: 22,2V (6S)
- Energía: 355,2 Wh
- Peso: 1974 gramos
- Dimensiones: 190 × 76 × 65 mm
- Precio: 564,61 €

Por otro lado, los drones sanitarios requieren contenedores especializados para el transporte seguro de material biológico o medicamentos. El costo de estos contenedores depende de su diseño y nivel de protección. Por ejemplo, un kit homologado para el transporte de muestras biológicas categoría B (UN3373) de la empresa Fríobox tiene un precio de 38,95 euros. Este kit incluye elementos como una caja isotérmica, una bolsa validada y papel absorbente, asegurando el cumplimiento normativo y la seguridad del contenido.

Asimismo, las estaciones de aterrizaje y recarga son otro componente clave del ecosistema de drones sanitarios. Según Matternet, su estación de aterrizaje, diseñada para durar al menos cinco años con un mantenimiento mínimo, genera costos anuales inferiores al 10% del costo de un operador humano.

Aunque ni Matternet ni las demás empresas han divulgado públicamente el costo exacto de su estación de aterrizaje, se pueden considerar referencias de soluciones similares en el mercado. Por ejemplo, el DJI Dock, una plataforma automatizada de despegue, aterrizaje y recarga para drones, tiene un precio de 6611,57€. DJI también ofrece opciones más avanzadas, cuyo precio puede llegar a los 9.000€. Dado que la estación de Matternet ofrece funcionalidades avanzadas específicas para operaciones logísticas y sanitarias, es posible que su costo sea superior al del DJI Dock. Sin embargo, sin datos oficiales, es difícil proporcionar una cifra exacta.

4.3 Impacto ambiental y sostenibilidad

La transición hacia el uso de drones y aeronaves eVTOL en el sector sanitario representa un avance significativo no sólo en términos operativos, sino también en sostenibilidad ambiental. En este contexto, los helicópteros, actualmente utilizados en servicios de emergencias médicas, son el medio aéreo más comparable a estas tecnologías emergentes. Por ello, resulta pertinente analizar las diferencias en impacto ambiental entre estas tecnologías, destacando los beneficios de los eVTOL en emisiones, consumo energético y contaminación acústica.

Una de las principales ventajas ambientales de los drones y eVTOL es su propulsión eléctrica, que elimina las emisiones directas de carbono durante su operación. En contraste, los helicópteros, como el Airbus H135 y el Airbus H145, utilizan motores de combustión interna que dependen de combustibles fósiles como el Jet-A o Jet-A1. Estos motores no solo generan emisiones significativas, sino que también tienen una menor eficiencia energética.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el consumo promedio de combustible del Airbus H135, uno de los helicópteros más utilizados en operaciones sanitarias en España, oscila entre 140 y 150 litros por hora, mientras que el Airbus H145 consume entre 180 y 200 litros por hora. Considerando que la quema de 1 kg de combustible Jet-A o Jet-A1 produce aproximadamente 3.16 kg de CO₂, estos valores equivalen a emisiones de entre 442,4 y 474 kg de CO₂ para el H135 y entre 568,8 y 632 kg de CO₂ para el H145, por cada hora de vuelo.

En cambio, los eVTOL no generan emisiones durante su operación directa. Sin embargo, su impacto ambiental está vinculado al origen de la electricidad utilizada para cargar sus baterías. Si esta electricidad proviene de fuentes renovables como solar o eólica, las emisiones indirectas pueden reducirse casi a cero. No obstante, es crucial considerar el impacto

ambiental asociado a la producción de baterías de iones de litio, ya que la extracción de metales como litio, cobalto y níquel conlleva un costo ambiental en términos de emisiones y consumo de recursos.

Los eVTOL también presentan una eficiencia energética significativamente superior a los helicópteros. Sus motores eléctricos convierten la electricidad directamente en movimiento con mínimas pérdidas energéticas, mientras que los motores de combustión interna convierten solo una fracción de la energía química del combustible en movimiento, perdiendo una parte importante en forma de calor y fricción. Esto implica un menor consumo energético y una huella ambiental más reducida, especialmente si se utiliza electricidad proveniente de fuentes limpias.

La contaminación acústica es otro factor en el que los drones y eVTOL presentan una ventaja significativa sobre los helicópteros. Los helicópteros generan un nivel de ruido elevado debido a la interacción del rotor principal con el aire y los sistemas de transmisión mecánica, lo que puede ser problemático en entornos urbanos y cerca de hospitales. Por ejemplo, el H145 genera un nivel de ruido de 85,7 dB durante el vuelo, según las especificaciones del fabricante. En comparación, los eVTOL generan un nivel de ruido considerablemente más bajo debido a la naturaleza de sus motores eléctricos. Por ejemplo, el eVTOL desarrollado por Joby produce 65 dB a 100 metros de altitud y de 45,2 dB a 500 metros, un nivel apenas perceptible en ambientes urbanos.

Capítulo 5. EJEMPLO PRÁCTICO

Este capítulo tiene como objetivo ilustrar la aplicabilidad de drones y eVTOL en el ámbito sanitario mediante un análisis práctico centrado en el Hospital Vall d'Hebron, el principal centro médico de Cataluña. Este hospital, que desempeña un papel crucial en la atención especializada de la región, enfrenta retos logísticos significativos derivados de su elevado volumen de pacientes, la diversidad de servicios que presta y su amplia área de influencia.

La sección se desarrolla en dos apartados principales: primero, se describe el contexto y situación actual, a partir del cual se identifican las limitaciones y necesidades que justifican el uso de estas tecnologías. A continuación, se proponen soluciones innovadoras que aprovechan las capacidades de drones y eVTOL para abordar dichas necesidades. En este último apartado, se incluye además una estimación de costos que analiza tanto la inversión inicial como los costos operativos de cada propuesta, proporcionando una visión económica integral para su implementación.

5.1 Contexto y situación actual

Para comprender las necesidades logísticas específicas del Hospital Vall d'Hebron y explorar el potencial de los drones y VTOL en el ámbito sanitario, se llevó a cabo una entrevista con la Dra. Maria Queralt Gorgas, directora clínica del Servicio de Farmacia de este hospital. Durante la reunión, se discutieron los desafíos actuales en la logística hospitalaria y se identificaron áreas clave donde estas tecnologías podrían marcar una diferencia significativa.

La Dra. Gorgas destacó la importancia de la logística aérea para la distribución de medicamentos y la gestión de emergencias, subrayando cómo el transporte rápido y eficiente puede mejorar significativamente la atención al paciente. Además, compartió información valiosa sobre las limitaciones del sistema actual, las características de la infraestructura del hospital y las posibles aplicaciones de estas tecnologías en contextos concretos.

Con base a esta entrevista, se identificaron tres áreas principales de interés: la logística de medicamentos, el transporte de órganos, y personal médico, y la gestión de emergencias en regiones aisladas. A continuación, se detalla el estado actual de estas operaciones, las limitaciones existentes y las oportunidades que ofrecen los drones y eVTOL.

5.1.1 Logística actual del Hospital Vall d'Hebron

El Hospital Vall d'Hebron, reconocido como el principal centro médico en Cataluña, atiende a una población extensa y diversa, con una capacidad logística que abarca tanto servicios de emergencia como operaciones regulares. Actualmente, el hospital proporciona medicación especializada a más de 35000 pacientes al año. Estas medicinas, que no están disponibles en farmacias convencionales, deben ser recogidas por los pacientes entre cuatro y seis veces al año, lo que plantea desafíos logísticos significativos.

El proceso actual para la distribución de medicamentos contempla las siguientes modalidades:

- **Recogida en el hospital:** Este método es el más utilizado y se organiza mediante una programación preestablecida. Sin embargo, aproximadamente el 25-30% de los pacientes acuden de manera espontánea, como aquellos que inician un tratamiento y necesitan medicación de forma inmediata. En estos casos, es imprescindible que el hospital se adapte para garantizar la disponibilidad del medicamento, ya que solicitar al paciente que regrese otro día puede resultar contraproducente para su tratamiento y bienestar.
- **Entrega a domicilio (implementada durante la pandemia):** Durante la pandemia de COVID-19, se adoptó un sistema de envío a domicilio que resultó eficaz debido a que los pacientes se encontraban siempre en sus hogares. Sin embargo, tras la pandemia, este método perdió efectividad, ya que los pacientes no siempre se encontraban en sus domicilios para recibir las entregas. Además, al tratarse de medicación especializada que requiere condiciones de entrega seguras y controladas, no era posible depositar los paquetes en ubicaciones no supervisadas, lo que añadía complejidad al proceso.
- **Entrega a través de farmacias:** Posterior a la pandemia, se introdujo un sistema de entrega a través de colegios farmacéuticos y oficinas de farmacia. Este modelo permite a los pacientes seleccionar la farmacia más conveniente para recoger su medicación. Aunque esta modalidad mejora la accesibilidad y reduce el desplazamiento de los pacientes, implica una carga operativa considerable para el hospital, incluyendo la coordinación con las farmacias y los pacientes, el empaquetado y la planificación de los envíos.

5.1.2 Limitaciones del sistema actual e identificación de necesidades

En la entrevista se identificaron una serie de limitaciones operativas que afectan a la eficacia del sistema logístico del hospital. Estas limitaciones destacan áreas clave donde el uso de drones y VTOL podría ofrecer soluciones innovadoras para superar dichos desafíos.

Una de las principales limitaciones es la carga de trabajo adicional que genera la gestión de entregas a través de farmacias. Este proceso implica coordinar la logística con los pacientes y las oficinas farmacéuticas, además de preparar y empaquetar los medicamentos, lo que representa un esfuerzo considerable en comparación con la recogida directa en el hospital por parte del paciente.

Otro desafío o limitación del sistema logístico actual es la accesibilidad a medicamentos, especialmente en áreas rurales o aisladas. La doctora, quien anteriormente fue responsable del Hospital de Cerdanya, mencionó que durante el invierno, las nevadas pueden bloquear las vías de acceso, dificultando el transporte de medicamentos esenciales a esta región y exponiendo a los pacientes a riesgos innecesarios debido a la falta de disponibilidad inmediata.

Los medicamentos especializados, como antídotos para intoxicaciones o fármacos poco frecuentes y costosos, suelen estar disponibles únicamente en hospitales principales, como el Vall d'Hebron. Actualmente, su distribución depende del transporte por ambulancia o de la movilidad del paciente, lo que puede ocasionar demoras significativas en casos donde el tiempo es determinante para salvar vidas.

Para abordar estas limitaciones, se identificaron las siguientes necesidades logísticas específicas que podrían ser resueltas mediante el uso de drones y eVTOL:

- **Entrega recurrente o urgente de medicamentos y suministros médicos:** El uso de drones para distribuir medicamentos a farmacias u otros hospitales en zonas urbanas y rurales permitiría mejorar la rapidez y eficiencia en la entrega. Además, estas aeronaves serían útiles para gestionar entregas urgentes para pacientes que inician tratamientos o requieren medicamentos críticos.
- **Transporte de órganos y personal médico:** El Hospital Vall d'Hebron realiza aproximadamente 500 trasplantes de órganos al año, consolidándose como un centro de referencia en esta área, especialmente en trasplantes pediátricos y en el tratamiento de enfermedades raras. En el proceso de trasplante, los órganos deben ser recolectados rápidamente del lugar donde ocurre el fallecimiento del donante y transportados de manera eficiente y segura al hospital receptor. Dado que el tiempo es un factor crítico para garantizar la viabilidad del órgano, la doctora reconoció la utilidad de los eVTOL para llevar a cabo este tipo de transporte con mayor rapidez y fiabilidad.

Además, la doctora mencionó que en algunos casos el hospital debe trasladar personal médico al lugar donde se encuentra el donante, ya que los hospitales locales a menudo carecen de los recursos necesarios para realizar la extracción del órgano. Este traslado se ve especialmente afectado en entornos urbanos como Barcelona, donde la congestión en vías principales, como las Rondas de Barcelona, puede retrasar significativamente el tiempo de respuesta. La doctora también enfatizó la utilidad de los eVTOL para facilitar el transporte del equipo médico al lugar de extracción y garantizar el regreso seguro con el órgano al hospital receptor, optimizando así el proceso de trasplante.

- **Gestión en zonas aisladas:** En regiones afectadas por condiciones meteorológicas extremas, los drones podrían ser empleados para mantener operaciones logísticas sin interrupciones.

5.1.3 Infraestructura existente

El Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d'Hebron cuenta con un helipuerto ubicado en la cubierta del ala oeste. Este helipuerto fue inaugurado en 2021 y reemplazó al anterior, situado a nivel del suelo, con el objetivo de optimizar la eficiencia operativa en la atención de emergencias. La infraestructura consta de una plataforma octogonal de aluminio de 17,5 metros de diámetro, montada sobre una estructura de acero y rodeada por un área de seguridad libre de obstáculos. Está diseñada para soportar helicópteros medicalizados con un peso de hasta siete toneladas.

La ubicación en la cubierta permite un acceso directo a urgencias a través de un sistema de ascensores inteligentes, que bloquean automáticamente su uso general cuando el SEM (Sistema de Emergencias Médicas) notifica la llegada de un helicóptero. Este diseño redujo el tiempo de traslado desde el helipuerto hasta urgencias de 15 a tan solo 2 minutos, representando un avance significativo en la atención de pacientes críticos.

En promedio, el helipuerto gestiona alrededor de 250 operaciones anuales. Los pacientes trasladados incluyen personas con politraumatismos, quemaduras graves, ictus, infarto agudo de miocardio, sepsis grave y otras patologías tiempo-dependientes, donde la rapidez en la atención es crucial para mejorar los resultados clínicos.

A pesar de su eficiencia, la necesidad de mantener el helipuerto siempre operativo para helicópteros medicalizados limita su disponibilidad para otras operaciones, como las que podrían realizarse con drones o VTOL. Sin embargo, la doctora entrevistada señaló que el antiguo helipuerto, actualmente en desuso, podría adaptarse para gestionar este tipo de operaciones sin interferir con las actividades del helipuerto principal.



Figura 14. Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d'Hebron.
Fuente: Google Earth



Figura 15. Helipuerto del Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d’Hebron desde abajo. Fuente: [84]

5.2 Propuesta

Se propone la adaptación del antiguo helipuerto del Hospital Vall d’Hebron como base operativa para drones y eVTOL. Este espacio, actualmente en desuso, ofrece una infraestructura que puede habilitarse para estas tecnologías sin interferir con las operaciones del helipuerto principal, reservado exclusivamente a helicópteros medicalizados.

Los drones se presentan como la herramienta más adecuada para cubrir la mayoría de las necesidades logísticas identificadas, especialmente la distribución de medicamentos y suministros médicos. Estos son idóneos tanto para entregas regulares como para situaciones de emergencia, destacando por su facilidad de implementación y menor necesidad de infraestructura en comparación con los eVTOL.

Entre los modelos analizados en el capítulo 2, el dron Eiger de Rigittech se considera la opción más adecuada debido a que ofrece una alta autonomía, está diseñado para operaciones BVLOS, cuenta con un sistema en la nube para gestión remota y ha sido validado mediante pruebas piloto en entornos reales.

La autonomía del Eiger varía según el peso de la carga transportada, tal como se detalla en la siguiente tabla extraída de su ficha técnica:

Flight Performance		0 kg	1 kg	2 kg	3 kg
Max. Range and Flight Time	Direct one-way	100 km 57 min	90 km 52 min	85 km 49 min	80 km 46 min
	Two-way reverse	45 km	40 km	37 km	35 km

Tabla 3. Máxima autonomía y tiempo de vuelo del dron Eiger según la carga transportada.

Fuente: [19]

A partir de estos datos, se generó un mapa mediante la herramienta ArcGIS para analizar la cobertura potencial del dron desde el Hospital Vall d’Hebron (Figura 15). En este mapa se muestran las distancias máximas alcanzables según el peso de la carga transportada, junto con la ubicación de todos los hospitales de Cataluña. Los detalles son los siguientes:

- Círculo amarillo (80 km): Cobertura con carga máxima (3 kg).
- Círculo rojo (85 km): Cobertura con una carga de 2 kg.
- Círculo verde (90 km): Cobertura con una carga de 1 kg.

- Marcador rojo: Ubicación del Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d’Hebron.
- Marcadores azules: Señalan los hospitales.

En este análisis se ha propuesto recargar las aeronaves en el hospital de destino para maximizar la cobertura, ya que no es necesario que estas regresen inmediatamente. Aunque la imagen incluye únicamente hospitales, se podrían integrar farmacias y centros médicos.

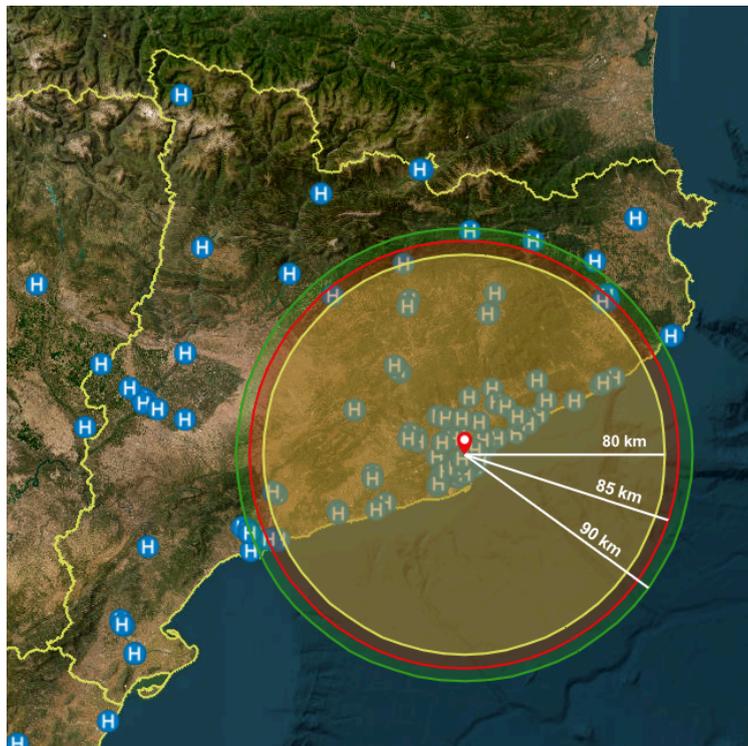


Figura 16. Cobertura del dron Eiger desde el Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados Vall d’Hebron y localización de hospitales en Cataluña. Fuente: Propia

El análisis muestra lo siguiente:

- Dentro del círculo amarillo, se encuentran la mayoría de los hospitales.
- El círculo rojo incluye 18 hospitales más respecto al círculo amarillo.
- El círculo verde incluye 4 hospitales adicionales, totalizando 22 hospitales más respecto al círculo amarillo.
- Hay hospitales fuera del rango operativo del dron, por lo que se requerirán soluciones complementarias.
- El hospital más lejano identificado es el Hospital Val d’Aran, ubicado aproximadamente a 180 km. El segundo hospital más lejano se encuentra a 154 km. Estas distancias exceden la autonomía máxima del Eiger incluso con carga mínima, lo que resalta la necesidad de alternativas para este tipo de trayectos.

Los drones sanitarios, como el Eiger, se proponen principalmente para el transporte de medicamentos ligeros y muestras biológicas. Sin embargo, el transporte de órganos requiere

aeronaves con mayor capacidad de carga, como los eVTOL. Por ejemplo, un hígado, cuyo peso oscila entre 1,5 y 2 kg, debe ser transportado junto con 4-7 litros de soluciones de preservación, materiales adicionales y un contenedor especializado. Este conjunto puede alcanzar fácilmente un peso superior a 3 kg, excediendo la capacidad máxima del Eiger, por lo que se recomienda la incorporación de eVTOL para estas operaciones críticas. Además, los eVTOL permiten transportar personal médico al lugar de extracción del órgano, una necesidad logística identificada previamente.

El Hospital Vall d'Hebron contaba originalmente con un helipuerto a nivel del suelo. Sin embargo, la entrada en vigor del Real Decreto del 17 de noviembre de 2015 [102], que establecía nuevas normativas técnicas de seguridad para aeródromos y helipuertos no comerciales, exigió adaptaciones significativas en las instalaciones existentes. Estas normativas, de aplicación obligatoria a partir de 2016, imponían requisitos actualizados relacionados con el diseño, la construcción, el uso y el funcionamiento de helipuertos, reemplazando las regulaciones previas del año 1957 y sus modificaciones posteriores en 2011.

El antiguo helipuerto no cumplía con estas normativas debido a su proximidad a edificios circundantes, lo que obligaba a los helicópteros a realizar maniobras excesivamente verticales, comprometiendo la seguridad operativa. Como solución, se construyó un nuevo helipuerto en la cubierta del hospital. Durante el período de construcción del nuevo helipuerto, se habilitó un helistop provisional al otro lado de la Ronda de Dalt para asegurar la continuidad del servicio de transporte aéreo. Esta medida temporal permitió al hospital mantener su capacidad de recepción y traslado de pacientes críticos mediante helicópteros, minimizando las interrupciones operativas hasta la inauguración del nuevo helipuerto en 2021 (Figura 16).



Figura 17. Ubicación del nuevo y antiguo helipuerto y del helipuerto provisional.

Fuente: Propia

Los eVTOL se presentan como una solución viable para superar las limitaciones de las maniobras verticales que enfrentaban los helicópteros en el antiguo helipuerto. Estas aeronaves, diseñadas para operar en entornos urbanos congestionados, ofrecen mayor estabilidad y precisión en estas maniobras. Entre los modelos analizados en el capítulo 2, destacan el ALIA-250, el Integrity y el Joby por su autonomía. Sin embargo, presentan diferencias significativas que condicionan su idoneidad para operaciones logísticas y médicas en Cataluña:

- **ALIA-250:** Aunque se proyecta que tendrá una autonomía superior a otros modelos, este eVTOL aún se encuentra en fases iniciales de desarrollo, y sus prestaciones no han sido completamente demostradas. Además, su proceso de certificación está siendo llevado a cabo bajo la FAA, lo que significa que necesitaría una certificación adicional por parte de la EASA para operar en Europa, lo cual puede alargar su proceso de implementación.
- **Joby:** Este modelo, con una autonomía de 160 km, ofrece una velocidad superior a los helicópteros tradicionales (como el H145 y el H135) y a los demás eVTOL. Esta aeronave permitiría cubrir todos los hospitales de Cataluña excepto uno (Hospital Val d'Aran). Sin embargo, su diseño está orientado principalmente al transporte de pasajeros y no cuenta con opciones específicas para aplicaciones sanitarias. Actualmente, está en proceso de certificación por la EASA.
- **Integrity:** Este modelo ofrece una configuración específica para el sector sanitario, además de una mayor capacidad en comparación con Joby. No obstante, su autonomía, de 130 km, es ligeramente inferior, lo que implica que un mayor número de hospitales quedarían fuera de su alcance operativo.. Actualmente, el Integrity también se encuentra en proceso de certificación por la EASA.

Otro aspecto a considerar al seleccionar la aeronave más adecuada es la compatibilidad con las dimensiones de la plataforma del antiguo helipuerto, ya que estas limitan el tamaño de las aeronaves que pueden operar en ella. Para evaluar esta viabilidad, se ha utilizado el Volumen de Referencia Tipo 1, definido por la EASA, que establece requisitos específicos para superficies de aproximación, áreas de seguridad y márgenes de maniobra. Según esta normativa, la FATO debe ser un cuadrado con lados equivalentes a $2D$, donde D es el diámetro del círculo más pequeño que puede encerrar toda la proyección horizontal de la aeronave en configuración de despegue o aterrizaje, incluyendo todos los elementos sobresalientes como los rotores.

La plataforma del antiguo helipuerto, medida mediante Google Earth, tiene una superficie de aproximadamente 25 metros, lo que limita el valor máximo de D a 12,5 metros. Este análisis condiciona el tipo de aeronave que puede ser operado en el espacio disponible:

- El Integrity, con una envergadura de 15 metros, requeriría una ampliación de la plataforma.
- El Joby, con una envergadura de 11,89 metros, es compatible con las dimensiones actuales y no requeriría modificaciones estructurales.

En este análisis se asume que las medidas de envergadura proporcionadas por los fabricantes incluyen las hélices y otros elementos sobresalientes, ya que las empresas no han facilitado información detallada al respecto. Si este no fuera el caso, es posible que incluso el Joby requiriese una ampliación de la plataforma.

Teniendo en cuenta estos factores, el Joby S4 se presenta como la opción más adecuada para el Hospital Vall d'Hebron debido a su compatibilidad con la infraestructura actual, su mayor autonomía y velocidad, y su capacidad para cubrir casi todos los hospitales de Cataluña con una sola carga, con la excepción del Hospital Val d'Aran.

En la Figura 17 se presentan ejemplos de posibles vertipuertos con el Volumen de Referencia Tipo 1 establecidos en el antiguo helipuerto del hospital Vall d'Hebron. Esta representación no está a escala y tiene únicamente fines ilustrativos; para evaluar su idoneidad real sería necesario realizar estudios más detallados.

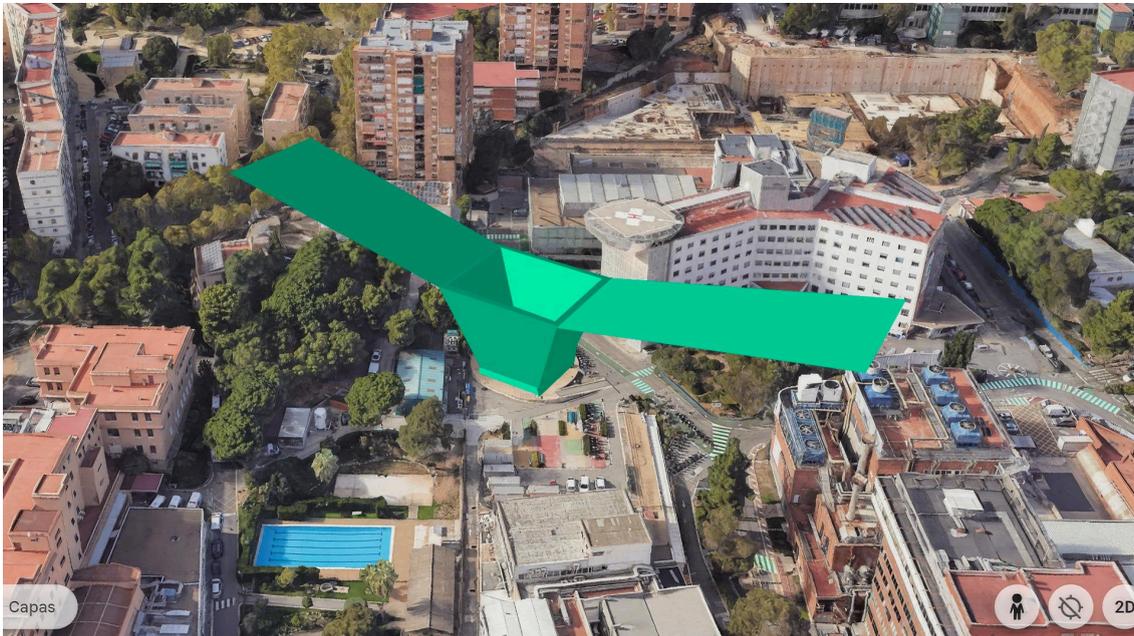


Figura 18. Ejemplos de posibles vertipuertos con el volumen de referencia Tipo 1 establecidos en el antiguo helipuerto del hospital Vall d'Hebron (solo con fines ilustrativos; para evaluar su idoneidad real sería necesario un estudio técnico detallado). Fuente: Propia

Las medidas del Volumen de Referencia Tipo 1 para la aeronave Joby S4 son las siguientes:

Parameter	Reference Volume Type 1 (Joby)
h1	3 m
h2	30,5 m
TO width	35,67 m (3D)
TO front	35,67 m (3D)
TO back	23,78 m (2D)
FATO width	23,78 m (2D)
FATO front	23,78 m (2D)
FATO back	11,89 m (1D)
θ app	12,5%
θ dep	12,5%

Tabla 4. Parámetros del Volumen de Referencia Tipo 1 para la aeronave Joby S4. Fuente: Propia

Es importante señalar que la representación se ha realizado de forma orientativa considerando las siguientes premisas:

- La altura del nuevo helipuerto se estima en 34,30 metros sobre el nivel del suelo.
- La altura máxima del Volumen de Referencia Tipo 1, definida por EASA, es de **30,5 metros**, lo que asegura que este volumen queda por debajo de la infraestructura del nuevo helipuerto.
- El área proyectada a nivel del suelo es menor a 25 metros por lo que se encuentra contenida dentro del perímetro del antiguo helipuerto.

El objetivo de esta ilustración es facilitar la comprensión de cómo el volumen de referencia interactúa con el entorno del hospital y evaluar de manera preliminar la viabilidad de este espacio para operaciones con eVTOL. Para un análisis definitivo sería necesario realizar un estudio técnico detallado con medidas exactas.

La operatividad de los eVTOL está directamente influenciada por la necesidad de recargar sus baterías, lo que condiciona la distancia efectiva para realizar operaciones de ida y vuelta. Según la naturaleza de la misión, se plantean las siguientes posibilidades:

- Operaciones urgentes: En casos críticos, como el transporte de un equipo médico para realizar una extracción de órgano y regresar con este al hospital, la distancia máxima viable sin recarga intermedia sería de 80 km, dado que minimizar el tiempo es esencial para garantizar el éxito de la operación. Sin embargo, esta limitación implica que no se podrían abastecer todos los hospitales de Cataluña.
 - Intercambio de aeronaves: Si el hospital de destino cuenta con un eVTOL adicional completamente cargado, sería posible realizar un intercambio, permitiendo cubrir distancias de hasta 160 km sin demoras significativas.

- Operaciones no urgentes: En situaciones donde el tiempo de carga no sea un factor crítico, el eVTOL podría cubrir los 160 km completos antes de recargar en el hospital de destino. De esta forma se permite cubrir prácticamente todos los hospitales de Cataluña, excepto el Hospital Val d'Aran.

Aunque no se pueda garantizar el acceso a todos los hospitales de Cataluña con las actuales capacidades de los eVTOL, la implementación de estas tecnologías representa un avance significativo en la logística sanitaria. La posibilidad de atender la mayoría de los hospitales del territorio catalán de manera más rápida y eficiente supone una mejora considerable frente a las limitaciones actuales, sentando las bases para una futura expansión y optimización del sistema.

Finalmente, se plantean varias opciones para la utilización del antiguo helipuerto del Hospital Vall d'Hebron como base operativa para drones y eVTOL. Cada alternativa requiere un análisis técnico y operativo detallado para maximizar su eficiencia y adaptabilidad:

1. **Operaciones exclusivas con drones:** Esta opción implicaría la instalación de estaciones de carga y almacenamiento específicas para drones, similares a las utilizadas por Matternet, donde los drones puedan recargarse y almacenarse cuando no estén en uso. Dado el tamaño del helipuerto, sería posible operar múltiples drones simultáneamente, permitiendo una logística más dinámica y eficiente para la distribución de medicamentos y suministros.
2. **Operaciones exclusivas eVTOL:** Según las dimensiones evaluadas en este estudio, el antiguo helipuerto parece ofrecer un espacio suficiente para operar un eVTOL bajo las condiciones actuales. No obstante, es imprescindible llevar a cabo un análisis técnico, operativo y económico más exhaustivo para garantizar su viabilidad y cumplimiento con las normativas. Aunque se ha utilizado el Volumen de Referencia Tipo 1 como base para esta evaluación, podrían considerarse otros modelos definidos por la EASA que sean más adecuados. Un ejemplo es el volumen omnidireccional circular, que permite declarar sectores prohibidos; esta configuración podría ser una solución viable para minimizar interferencias con el helipuerto nuevo.
3. **Combinación de ambas operaciones:** En caso de que las operaciones con eVTOL no sean constantes, se podría aprovechar el antiguo helipuerto para el uso de drones en los intervalos en los que no sea requerido por los eVTOL. Esta opción implicaría una planificación operativa rigurosa y una gestión del espacio aéreo adecuada para evitar interferencias entre ambos tipos de aeronaves. Como alternativa, y siempre que la normativa y la propiedad del terreno lo permitan, el antiguo helistop podría transformarse en una base operativa dedicada exclusivamente a drones. Esto permitiría destinar el antiguo helipuerto exclusivamente a las operaciones de eVTOL, garantizando una separación clara y eficiente entre ambos tipos de operaciones.

Estas alternativas destacan la flexibilidad del antiguo helipuerto para adaptarse a las necesidades operativas de drones y eVTOL. La implementación de cualquiera de estas opciones supondría un avance significativo hacia la modernización de la infraestructura logística del Hospital Vall d'Hebron, permitiendo un acceso más rápido y eficiente a los servicios sanitarios.

5.2.1 Estimación de Costos

Como se detalla en el apartado 4.2, la implementación de drones y eVTOL en el ámbito sanitario ofrece oportunidades significativas para optimizar costos y generar valor económico a largo plazo. En este capítulo se han explorado distintas soluciones logísticas para el Hospital Vall d'Hebron, considerando las capacidades específicas de drones y eVTOL según las necesidades identificadas. A continuación, se presenta una estimación de costos segmentada para cada propuesta tecnológica:

1. Propuesta basada en drones sanitarios:

- Costo unitario: Modelos como el Eiger de Rigittech tienen un costo aproximado de 10000 a 30000 euros por unidad, dependiendo de las especificaciones y funcionalidades.
- Costo de la estación de carga: El costo estimado de una estación de carga automatizada, como las propuestas por Matternet o DJI, oscila entre 6000 y 10000 euros.
- Costo del mantenimiento anual: El mantenimiento anual del dron se estima entre el 10-20% de su costo inicial, lo que equivale aproximadamente a \$1000 - \$6000 por unidad, dependiendo de la intensidad de las operaciones y el modelo.
- Costo de las baterías: Tal y como se analizó en el capítulo 4, el dron Eiger utiliza baterías de iones de litio con un costo aproximado de 839 € por unidad. Estas baterías tienen una vida útil estimada de 800 ciclos, lo que equivale a aproximadamente 1 año de uso diario (730 vuelos anuales, considerando dos ciclos por día). Sin embargo, su duración real puede variar según las condiciones de operación y el mantenimiento realizado.
- Consumo de energía eléctrica: El dron Eiger está equipado con una batería de 976,8 Wh de capacidad. Considerando que realiza dos vuelos diarios, con una carga completa requerida por vuelo, y utilizando un precio promedio de 0,203046 €/kWh, el costo anual estimado de la energía eléctrica para operar un dron bajo estas condiciones es de 144,75 €.

En resumen, la inversión inicial requerida para implementar un dron Eiger, incluyendo el costo del dron y una estación de carga, se estima en un promedio de 27000 euros. Posteriormente, el costo anual operativo, considerando el mantenimiento, las baterías y el consumo eléctrico, tiene un promedio de 4500 euros por unidad.

El antiguo helipuerto del hospital Vall d'Hebron, con un diámetro de 25 metros, tiene una superficie de 490,87 m², lo que lo hace adecuado para almacenar una flota de drones junto con sus estaciones de carga. Para una flota de 20 drones, el costo inicial ascendería a 540 mil euros.

2. Propuesta basada en eVTOL:

- Costo unitario: Un eVTOL como el Joby S4, se estima que tenga un costo aproximado de 1 millón de dólares por unidad.

- **Mantenimiento anual:** Los costos de mantenimiento para un eVTOL se estiman en torno al 9% del costo inicial de la aeronave. Por tanto, el costo promedio anual sería de 90000 dólares. Esto incluye inspecciones periódicas, actualizaciones de software, y reemplazo de componentes críticos.
- **Infraestructura:** Dado que la infraestructura existente incluye un helipuerto en desuso, se prevé que los costos de adecuación serían significativamente menores en comparación con la construcción desde cero. Un Vertipad sería la solución más adecuada, con un costo estimado de entre 1 y 2,5 millones de dólares, como se muestra en la Figura 13.
- **Consumo de energía eléctrica:** El Joby S4 utiliza un sistema de baterías de iones de litio con un peso total de aproximadamente 720 kg y una energía específica de 235 Wh/kg [105], lo que resulta en una capacidad total de 170 kWh. Su autonomía máxima es de 160 km, lo que implica un consumo energético de 1,0625 kWh/km. Considerando un recorrido diario de 100 km ida y vuelta, el costo anual sería de 7869,45€.
- **Entrenamiento y certificación:** En una primera etapa, los pilotos requerirán formación específica para operar estas aeronaves, ya que representan una tecnología emergente. Dado que no se dispone de información precisa sobre los costos asociados al entrenamiento y certificación para eVTOL, se ha asumido que estos valores serán similares a los establecidos para los helicópteros, entre 20000 y 50000 dólares anuales por piloto, dependiendo de la complejidad del sistema y las normativas locales. Sin embargo, a largo plazo, con la implementación de sistemas autónomos, se espera una disminución significativa en los costos de formación.

La inversión inicial para implementar esta solución, considerando el costo del eVTOL y la adecuación de infraestructura, se estima en un rango de 2,1 a 3,6 millones de dólares.

La solución basada en drones Eiger se presenta como una alternativa accesible y eficiente para cubrir necesidades logísticas recurrentes y de menor complejidad, como la distribución de medicamentos o muestras biológicas. Su bajo costo inicial y operativo lo convierten en una opción ideal para implementar en un contexto sanitario que busca optimizar recursos y mejorar la eficiencia operativa.

Por otro lado, la solución basada en el Joby S4 ofrece capacidades avanzadas que son cruciales para operaciones críticas, como el transporte de órganos o personal médico especializado. Aunque su costo es mayor en comparación con los drones, es importante destacar que los eVTOL siguen siendo más económicos que los helicópteros tradicionales, tanto en adquisición como en mantenimiento.

Un enfoque combinado, en el que los drones gestionen las operaciones logísticas regulares y los eVTOL se utilicen para tareas que requieran mayor autonomía, capacidad de carga o alcance, maximizaría la eficiencia del sistema logístico del hospital. Este modelo híbrido no sólo optimizaría los costos operativos, sino que también garantizaría una capacidad de respuesta rápida y efectiva para una amplia gama de necesidades logísticas.

De cara al futuro, será fundamental evaluar la evolución de las tecnologías disponibles y su compatibilidad con la infraestructura existente. Por ejemplo, aunque el Integrity presenta ciertas limitaciones debido a su tamaño y menor autonomía, podría convertirse en una opción viable si se realizan las adaptaciones necesarias en la infraestructura. Asimismo, se recomienda seguir de cerca los avances en modelos de eVTOL, como los futuros desarrollos de Joby con tecnología de hidrógeno, que ofrecen el potencial de alcanzar mayores autonomías y ampliar la cobertura territorial, abriendo nuevas oportunidades para la logística sanitaria.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto ha explorado el potencial de los drones y eVTOL en la logística sanitaria, analizando sus capacidades técnicas, su impacto en la eficiencia operativa y su viabilidad económica. A través del estudio de casos prácticos y proyectos piloto, como las iniciativas de Zipline en Ruanda y Matternet en Suiza, se ha contextualizado la implementación de estas tecnologías en diferentes escenarios, aportando ejemplos concretos de su aplicabilidad. Asimismo, se ha desarrollado una propuesta específica para el Hospital Vall d'Hebron, integrando estas tecnologías en el marco del sistema sanitario catalán.

Los resultados muestran que estas aeronaves tienen el potencial de transformar la logística sanitaria al reducir tiempos de respuesta, optimizar procesos y mejorar la accesibilidad, especialmente en áreas remotas o de difícil acceso. Su capacidad para automatizar y agilizar tareas como la distribución de medicamentos, el transporte de órganos y la gestión de emergencias ofrece soluciones innovadoras frente a las limitaciones operativas actuales. Además, estas tecnologías se alinean con los objetivos de sostenibilidad del sector sanitario gracias a su bajo impacto ambiental, representando un avance hacia prácticas más responsables y eficientes.

El marco normativo europeo, liderado por la EASA, está evolucionando de manera proactiva para integrar estas tecnologías de forma segura en el espacio aéreo, un paso clave para su implementación masiva. Aunque ambas tecnologías responden a necesidades complementarias, los drones han demostrado un mayor nivel de adopción, especialmente debido a su facilidad de implementación en aplicaciones específicas, como la entrega de medicamentos y muestras biológicas. Por su parte, los eVTOL destacan como solución para tareas más complejas gracias a su mayor capacidad de carga y alcance. Además, la diversidad de modelos de eVTOL en desarrollo amplía significativamente sus aplicaciones potenciales, adaptándose a una variedad de necesidades logísticas y operativas.

A lo largo del proyecto se han comparado los eVTOL con los helicópteros, destacando sus ventajas en términos de eficiencia operativa, estabilidad y sostenibilidad. Los eVTOL presentan un diseño basado en motores eléctricos y configuraciones de múltiples rotores, eliminando el torque generado por el rotor principal de los helicópteros y reduciendo las vibraciones. Estas características resultan en vuelos más estables y precisos, ideales para entornos urbanos y tareas críticas. Además, su menor consumo energético y mantenimiento simplificado los posicionan como una alternativa más económica y sostenible, que podría reemplazar a los helicópteros en muchas aplicaciones logísticas y sanitarias.

Sin embargo, los helicópteros suelen presentar mayores autonomías debido al uso de combustibles fósiles. En contraste, los eVTOL dependen de baterías eléctricas que, si bien se espera que alcancen capacidades destacables —como los 400 km previstos para modelos como

el ALIA-250—, requieren recargas frecuentes. Esta dependencia puede afectar la continuidad de las operaciones, particularmente en misiones de alta frecuencia o aquellas que impliquen largas distancias y mayores cargas. No obstante, los avances tecnológicos en baterías y sistemas de carga rápida están mitigando progresivamente esta limitación, posicionando a los eVTOL como una solución cada vez más competitiva y sostenible.

Aunque el hidrógeno representa una opción prometedora para extender las autonomías de los eVTOL y mejorar su sostenibilidad, su implementación enfrenta barreras tecnológicas, económicas y de infraestructura que la sitúan como una solución a mediano o largo plazo. Mientras tanto, los avances actuales en eVTOL eléctricos ofrecen una ruta viable para su integración progresiva en la movilidad aérea urbana, marcando un punto de inflexión hacia un modelo más moderno y eficiente.

Finalmente, el análisis práctico centrado en el Hospital Vall d'Hebron ha permitido identificar necesidades logísticas que podrían ser abordadas mediante la implementación de drones y eVTOL. Este caso concreto no solo ilustra la aplicabilidad de estas tecnologías en el ámbito sanitario, sino que también sienta las bases para un desarrollo futuro que explore en mayor profundidad su personalización para satisfacer las necesidades específicas de este hospital y otros centros sanitarios similares.

En conclusión, los drones y eVTOL tienen el potencial de revolucionar la logística sanitaria, ofreciendo beneficios significativos en términos de eficiencia, accesibilidad y sostenibilidad. Su implementación no solo es técnicamente viable, sino que también contribuye a un sistema sanitario más equitativo, preparado para afrontar los retos del futuro. Con los avances actuales en tecnología y normativas, su adopción masiva está cada vez más cerca, inaugurando una nueva era en la movilidad aérea y la gestión logística en múltiples sectores. No obstante, superar las limitaciones actuales, como la dependencia de las baterías, será clave para maximizar el impacto de estas tecnologías en el futuro.

REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Core Priorities", [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/europe/about-us/our-work/core-priorities>. [Accedido: 15 sept. 2024].
- [2] Consejería de Sanidad de Castilla y León, "Datos de recursos y actividad", [En línea]. Disponible en: <https://www.saludcastillayleon.es/transparencia/es/transparencia/informacion-datos-publicos/asistencia-sanitaria/emergencias-sanitarias/datos-recursos-actividad>. [Accedido: 15 sept. 2024].
- [3] Ayuntamiento de Madrid, "Atención sanitaria de urgencias", [En línea]. Disponible en: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Seguridad-y-emergencias/SAMUR-Protccion-Civil/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=c88fcd1b1bffa010VgnVCM100000d90ca8c0RCRD&vgnnextchannel=f9cd31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&idCapitulo=10268949>. [Accedido: 15 sept. 2024].
- [0] J. Holmén, J. Herlitz, S.-E. Ricksten, A. Strömsöe, E. Hagberg, C. Axelsson, y A. Rawshani, "Shortening Ambulance Response Time Increases Survival in Out-of-Hospital Cardiac Arrest", *Journal of the American Heart Association*, vol. 9, no. 21, Nov. 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.ahajournals.org/doi/epub/10.1161/JAHA.120.017048>. [Accedido: 16 sept. 2024].
- [5] P. A. Cortés P., "Aspectos claves-tiempo dependientes que amenazan la vida en el prehospitalario" *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 22, no. 5, pp. 571–584, Sep. 2011, [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0716864011704680>. [Accedido: 16 sept. 2024].
- [6] I. E. Blanchard, C. Doig, B. E. Hagel, y A. R. Anton, "Emergency Medical Services Response Time and Mortality in an Urban Setting", *Prehospital Emergency Care*, vol. 16, no. 1, pp. 142-151, Jan. 2012, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/51744872_Emergency_Medical_Services_Response_Time_and_Mortality_in_an_Urban_Setting. [Accedido: 16 sept. 2024].
- [7] RapidSOS, "Quantifying the Impact of Emergency Response Times", 2015, [En línea]. Disponible en: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/549701/Documents/RapidSOS_Outcomes_White_Paper_-_2015_4.pdf. [Accedido: 16 sept. 2024].
- [8] Fact.MR, "Medical Drone Market Forecast", [En línea]. Disponible en: <https://www.factmr.com/report/medical-drone-market>. [Accedido: 23 sept. 2024].
- [9] Fortune Business Insights, "Medical Drone Market Size, Share & Industry Analysis: Regional Forecast, 2024-2032", [En línea], Dic. 2024. Disponible en: <https://www.fortunebusinessinsights.com/medical-drone-market-105805>. [Accedido: 23 sept. 2024].
- [10] DroneXL, "Matternet tests longest drone delivery route between hospitals and labs in Switzerland", Dic. 15, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://dronexl.co/2022/12/15/matternet-drone-delivery-route-switzerland/>. [Accedido: 30 sept. 2024].

[11] Labor Berlin, "Time saves lives", [En línea]. Disponible en: <https://www.laborberlin.com/en/latest-news/update-drone-sample-transportation/>. [Accedido: 30 sept. 2024].

[12] Unmanned Airspace, "Matternet launches 5km BVLOS drone medical delivery route above Zurich", Dic. 13, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/matternet-launches-5km-bvlos-drone-medical-delivery-route-above-zurich/>. [Accedido: 30 sept. 2024].

[13] DroneXL, "Zipline Drone Deliveries Change Rwanda's Healthcare Logistics", Oct. 27, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://dronexl.co/2023/10/27/ziplines-drone-deliveries-rwanda/>. [Accedido: 30 sept. 2024].

[14] Zipline, "Zipline and the Government of Rwanda Announce a New Partnership to Serve the Entire Country with Instant Logistics", Dic. 15, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.flyzipline.com/newsroom/news/announcements/zipline-and-the-government-of-rwanda-announce-a-new-partnership-to-serve-the-entire-country-with-instant-logistics>. [Accedido: 30 sept. 2024].

[15] Zipline, "Revolutionizing Nigerian Healthcare and Economic Development With Autonomous Drones", Sept. 26, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.flyzipline.com/newsroom/news/announcements/revolutionizing-nigerian-healthcare-and-economic-development-with-autonomous-drones>. [Accedido: 30 sept. 2024].

[16] Wing, "NHS blood sample analysis now expedited by on-demand drone delivery service", Nov. 13, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://blog.wing.com/2024/11/nhs-blood-delivery.html>. [Accedido: 3 oct. 2024].

[17] CITET, "Finaliza el proyecto ALE-HOP en el que participa el Hospital Universitario La Paz mostrando con una demo la viabilidad del transporte de material sanitario con drones entre hospitales", Jul. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.citet.es/es/sala-de-prensa/ale-hop-la-paz-viabilidad-transporte-sanitario-drones-hospitales>. [Accedido: 3 oct. 2024].

[18] M. Bazo, "ALE-HOP: los drones entregarán material sanitario entre distintos hospitales de Madrid", Jul. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://logistica.cdcomunicacion.es/aereo/133872/ale-hop-drones-material-sanitario-madrid>. [Accedido: 3 oct. 2024].

[19] RigiTech, "DRAFT - Eiger-03 Technical Specifications Sheet and Services - Marketing", Ag. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://rigi.tech/wp-content/uploads/2023/09/Eiger-Technical-Spec-Sheet-Aug-2023.pdf>. [Accedido: 3 oct. 2024].

[20] RigiTech, "INTRODUCING Eiger", [En línea]. Disponible en: <https://rigi.tech/eiger/>. [Accedido: 3 oct. 2024].

[21] Zipline, "Company Datasheet", [En línea]. Disponible en: <https://zipline.imagerelay.com/share/faa450f29f72414bb4b98ca339fff9cd>. [Accedido: 10 oct. 2024].

[22] The Drone Girl, "Platform 2 drone: Zipline delivers with actual footage of its next-gen aircraft", Sept. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.thedronegirl.com/2024/09/23/platform-2-zipline/>. [Accedido: 10 oct. 2024].

[23] RigiTech, "RigiTech's Eiger Connects Hospitals in Barcelona, Pushes BVLOS Operations in Spain", Jun. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://rigi.tech/rigitechs-eiger-connects-hospitals-in-barcelona-pushes-bvlos-operations-in-spain/>. [Accedido: 10 oct. 2024].

[24] Matternet, "M2 Drone", [En línea]. Disponible en: <https://www.matternet.com/our-system-aircraft>. [Accedido: 10 oct. 2024].

[25] EASA, "Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)", Mar. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/prototype-technical-design-specifications-vertiports>. [Accedido: 10 oct. 2024].

[26] BETA Technologies, "BETA Timeline", [En línea]. Disponible en: <https://www.beta.team/timeline/>. [Accedido: 13 oct. 2024].

[27] New Atlas, "Video: Beta Alia nails first manned eVTOL transition to cruise flight", Abr. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://newatlas.com/aircraft/beta-alia-first-piloted-evtol-transition/>. [Accedido: 13 oct. 2024].

[28] LCI Aviation, "BETA ALIA 250", [En línea]. Disponible en: <https://www.lcaviation.com/fleet/beta-alia-250/>. [Accedido: 13 oct. 2024].

[29] Va-Q-Tech, "Last Mile Pharma - Products", [En línea]. Disponible en: <https://www.va-q-tec.com/en/business-areas/last-mile-pharma/>. [Accedido: 13 oct. 2024].

[30] Diario Oficial de la Unión Europea, "REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2019/947 DE LA COMISIÓN", My. 2019, [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[31] Matternet, "Matternet Receives First Light UAS Operator Certificate from Swiss Federal Office of Civil Aviation for Advanced Drone Operations," Sept. 10, [En línea]. Disponible en: <https://www.matternet.com/newsroom/matternet-receives-first-light-uas-operator-certificate-from-swiss-federal-office-of-civil-aviation-for-advanced-drone-operations>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[32] Business Wire, "Matternet Receives Authorization from the German Aviation Office to Launch BVLOS Drone Delivery Operations in Berlin", Dic. 12, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.businesswire.com/news/home/20231212271453/en/Matternet-Receives-Authorization-from-the-German-Aviation-Office-to-Launch-BVLOS-Drone-Delivery-Operations-in-Berlin>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[33] Joby Aviation, "Joby Announces Beginning of Work on First Dubai Vertiport", Nov. 12, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-announces-beginning-work-first-dubai-vertiport/>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[34] Joby Aviation, "Toyota and Joby Complete First Air Taxi Flight in Japan", Nov. 4, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/news/toyota-joby-complete-first-air-taxi-flight-japan/>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[35] Joby Aviation, "Joby Successfully Conducts First FAA Testing under TIA, Begins Final Phase of Certification Program", Dic. 20, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-successfully-conducts-first-faa-testing-under-tia/>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[36] Joby Aviation, "Joby demonstrates potential for emissions-free regional journeys with landmark 523-mile hydrogen-electric flight", Jul. 11, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-demonstrates-potential-regional-journeys-landmark-hydrogen-electric-flight/>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[37] Joby Aviation, "Flying 523 Miles, Emissions-Free: Joby's Hydrogen-Electric Demonstrator", Jul. 11, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=egR5buArDO4&t=11s>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[38] Archer, "Air Travel Reimagined: The flight of a lifetime, every day", [En línea]. Disponible en: <https://archer.com/aircraft>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[39] Archer, "Getting There Safely: Designing for Safety and Certification", [En línea]. Disponible en: <https://archer.com/certification>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[40] Inspenet, "Dos compañías lanzarán taxis aéreos eléctricos en Corea del Sur", My. 31, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.inspenet.com>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[41] Archer, "Future Flight Global Announces Planned Purchase of up to 116 Archer Midnight Aircraft Worth up to \$580M", Ag. 13, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://investors.archer.com/news/news-details/2024/Future-Flight-Global-Announces-Planned-Purchase-of-up-to-116-Archer-Midnight-Aircraft-Worth-up-to-580M/default.aspx>. [Accedido: 15 oct. 2024].

[42] Crisalion Mobility, "Integrity", [En línea]. Disponible en: <https://crisalion.com/air/integrity/>. [Accedido: 19 oct. 2024].

[43] MundoGeo, "Crisalion Mobility cierra la preventa de 10 eVTOLs Integrity con iJet", Jun. 21, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://mundogeo.com/es/2024/06/21/crisalion-mobility-cierra-la-preventa-de-10-evtols-integrity-con-ijet/>. [Accedido: 19 oct. 2024].

[44] RPASDrones, "CRISALION Mobility y UrbanLink Air Mobility firman acuerdo para la preventa de 20 aeronaves eVTOL", Dic. 13, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://rpas-drones.com/crisalion-urbanlink-preventa-evtol/>. [Accedido: 19 oct. 2024].

[45] Matternet, "OUR SYSTEM — REGULATORY APPROVALS", [En línea]. Disponible en: <https://www.matternet.com/our-system-certification>. [Accedido: 19 oct. 2024].

[46] EASA, "Special Condition for small-category VTOL aircraft", no. 1, Jul. 2, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01.pdf>. [Accedido: 20 oct. 2024].

[47] EASA, "Special Condition for VTOL and Means of Compliance", Jun.10, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/special-condition-vtol>. [Accedido: 20 oct. 2024].

- [48] EASA, "Downloads", [En línea]. Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/special-condition-vtol#group-easa-downloads>. [Accedido: 20 oct. 2024].
- [49] Rapita Systems, "Discover eVTOL Certification", [En línea]. Disponible en: <https://www.rapitasystems.com/certifying-evtol>. [Accedido: 20 oct. 2024].
- [50] EASA, "Despegue y aterrizaje en vertical (VTOL, por sus siglas en inglés)", [En línea]. Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/vertical-take-and-landing-vtol>. [Accedido: 20 oct. 2024].
- [51] Diario Oficial de la Unión Europea, "REGLAMENTO (UE) No 965/2012 DE LA COMISIÓN", Oct. 5, 2012, [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2012/296/L00001-00148.pdf>. [Accedido: 20 oct. 2024].
- [52] CNBC, "Zipline unveils P2 delivery drones that dock and recharge autonomously", Mar. 15, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.cnbc.com/2023/03/15/zipline-unveils-p2-delivery-drones-that-dock-and-recharge-autonomously.html>. [Accedido: 29 oct. 2024].
- [53] La Jornada Digital, "La empresa emergente Zipline dio a conocer la nueva línea de drones para hacer entregas a domicilio" Mar. 29, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://lajornadadigital.com/contenido/28942/la-empresa-emergente-zipline-dio-a-conocer-la-nueva-linea-de-drones-para-hacer-e>. [Accedido: 29 oct. 2024].
- [54] Zipline, "Building the future of autonomous delivery", [En línea]. Disponible en: <https://www.flyzipline.com/technology>. [Accedido: 29 oct. 2024].
- [55] C. Lyons, "Zipline receives the FAA's first-ever approval of airspace traffic management system for drone delivery", Jul. 30, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.flyzipline.com/newsroom/news/announcements/zipline-receives-the-faa-s-first-ever-approval-of-airspace-traffic-management-system-for-drone-delivery>. [Accedido: 29 oct. 2024].
- [56] Matternet, "OUR SYSTEM — LANDING STATION", [En línea]. Disponible en: <https://www.matternet.com/our-system-landing-station>. [Accedido: 3 nov. 2024].
- [57] Matternet, "OUR SYSTEM — SOFTWARE PLATFORM", [En línea]. Disponible en: <https://www.matternet.com/our-system-software-platform>. [Accedido: 3 nov. 2024].
- [58] L. Mejia, "Matternet Partners with ANRA Technologies to Enhance UTM Services for Expanding Urban Drone Networks", ANRA Technologies, Nov. 12, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.anratechnologies.com/home/2024/11/12/matternet-partners-with-anra-technologies-to-enhance-utm-services-for-expanding-urban-drone-networks/>. [Accedido: 3 nov. 2024].
- [59] Tourinews, "Aena pondrá en marcha vuelos de prueba de 'taxis aéreos' entre Mallorca y Menorca", Nov. 23, 2024, [En línea]. Disponible en: https://www.tourinews.es/resumen-de-prensa/notas-de-prensa-empresas-turismo/mallorca-menorca-aena-vuelos-prueba-taxis-aereos-volocopter-evtol_4483859_102.html. [Accedido: 11 nov. 2024].

[60] IFEMA Madrid, "Aena prevé lanzar dos vuelos demostrativos con aerotaxis entre 2025 y 2026", Nov. 19, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.ifema.es/global-mobility-call/notas-prensa/aena>. [Accedido: 11 nov. 2024].

[61] Boletín Oficial del Estado, "Real Decreto 1036/2017", Dic. 29, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-15721>. [Accedido: 13 nov. 2024].

[62] The Electric VTOL News, "Joby Aviation S4 2.0 (pre-production prototype)", [En línea]. Disponible en: <https://evtol.news/joby-s4>. [Accedido: 13 nov. 2024].

[63] W. Stickney, "Airbus H135 Price and Operating Costs", Sep. 3, 2024, Bolt Flight, [En línea]. Disponible en: <https://boltflight.com/airbus-h135-price-and-operating-costs/>. [Accedido: 20 nov. 2024].

[64] W. Stickney, "Airbus H145/Eurocopter EC145 Price and Operating Costs", Sep. 2, 2024, Bolt Flight, [En línea]. Disponible en: <https://boltflight.com/airbus-h145-eurocopter-ec145-price-and-operating-costs/>. [Accedido: 20 nov. 2024].

[65] Comunidad de Madrid, "Renovamos los dos helicópteros sanitarios del SUMMA 112 diseñados especialmente para emergencias", Nov. 3, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.comunidad.madrid/noticias/2020/11/03/renovamos-dos-helicopteros-sanitarios-summa-112-disenados-especialmente-emergencias>. [Accedido: 20 nov. 2024].

[66] Business Plans, "Costos operativos: el negocio de transporte de helicópteros", Sep. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://businessplan-templates.com/es/blogs/running-costs/helicopter-transportation>. [Accedido: 20 nov. 2024].

[67] Generalitat de Catalunya, "SEM - Sistema d'Emergències Mèdiques: Unitat de mitjans aeris", [En línea]. Disponible en: <https://sem.gencat.cat/ca/emergencies-mediques/serveis/serveis-especialitzats/unitat-mitjans-aeris/index.html>. [Accedido: 20 nov. 2024].

[68] Technical Evolution, "Volocopter VoloCity: Price, Certification, and Current Plans", Oct. 28, 2024, [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=xheD6_CLpMM. [Accedido: 25 nov. 2024].

[69] Jetson, "Order Your Jetson One", [En línea]. Disponible en: <https://jetson.com/order#orderForm>. [Accedido: 25 nov. 2024].

[70] The Electric VTOL News, "Volocopter VC Evolution 1P (defunct)", [En línea]. Disponible en: <https://evtol.news/volocopter-vc-evolution-1p>. [Accedido: 25 nov. 2024].

[71] M. Ros, "Archer secures \$580 million order for 116 Midnight eVTOLs", AeroTime, Aug. 14, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.aerotime.aero/articles/archer-secures-580-million-order-for-116-midnight-evtols>. [Accedido: 25 nov. 2024].

[72] friobox, "Kit homologado para transporte de muestras biológicas CAT. B (UN3373) a temperatura congelada o refrigerada", [En línea]. Disponible en: <https://friobox.es/producto/kit-homologado-transporte-sustancias-biologicas-catb-un3373-congelada-o-refrigerada/>. [Accedido: 26 nov. 2024].

[73] RCDrone, "Tattu Plus 22000mAh 44.4V 25C 12S1P Lipo Smart Battery Pack With AS150 Plug", [En línea]. Disponible en: <https://rcdrone.top/products/tattu-plus-22000mah-44-4v-25c-12s1p-lipo-smart-battery-pack-with-as150-plug>. [Accedido: 26 nov. 2024].

[74] RCDrone, "Tattu G-Tech 6S 22000mAh 30C 22.2V Lipo Battery with XT90-S Plug for UAV", [En línea]. Disponible en: https://rcdrone.top/products/tattu-g-tech-6s-22000mah-30c-22-2v-lipo-battery-with-xt90-s-plug-for-uav?currency=USD&variant=45763635806432&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Google%20Shopping&stkn=677f40c1dee9&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA7Y28BhAnEiwAAAdOJUKCsk0i4ucgnu2Jdl6Nm41NZofD0a0-rfHYKU7mxav35YRSu7xiV_BoCQYUQAvD_BwE. [Accedido: 26 nov. 2024].

[75] DirectIndustry, "Dron para la logística M2", [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/matternet/product-182355-1801036.html>. [Accedido: 29 nov. 2024].

[76] Swiss Transportation Safety Investigation Board (STSB), "Final Report No. 2390", [En línea]. Disponible en: https://www.sust.admin.ch/inhalte/AV-berichte/SUI-9903_SB_e.pdf. [Accedido: 29 nov. 2024].

[77] Swiss Post, "Drone Logistics: Matternet M2V9: Specifications (January 2020)", [En línea]. Disponible en: <https://www.post.ch/-/media/portal-opp/k/dokumente/factsheet-drohne.pdf>. [Accedido: 29 nov. 2024].

[78] Grupo Acre, "DJI Dock 2 plataforma de despegue y aterrizaje", [En línea]. Disponible en: <https://grupoacre.es/catalogo-productos/dji-dock-2-plataforma-de-despegue-y-aterrizaje/>. [Accedido: 29 nov. 2024].

[79] Organización de Aviación Civil Internacional, "Tercera Conferencia sobre la Aviación y los Combustibles Alternativos (CAAF/3)", Dubái, Emiratos Árabes Unidos, Nov. 20-24, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF3/Documents/CAAF.3.WP.006.2.sp.pdf>. [Accedido: 29 nov. 2024].

[80] Joby Aviation, "Joby Confirms Revolutionary Low Noise Footprint Following NASA Testing", My. 10, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-revolutionary-low-noise-footprint-nasa-testing/>. [Accedido: 29 nov. 2024].

[81] Airbus, "H145 technical information", [En línea]. Disponible en: <https://www.airbus.com/en/products-services/helicopters/civil-helicopters/h145/h145-technical-information>. [Accedido: 29 nov. 2024].

[82] BBC, "Swiss hospital drones to take off again", Jan. 23, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/technology-51228214>. [Accedido: 29 nov. 2024].

[83] Vall d'Hebron, "Vall d'Hebron estrena nuevo helipuerto en la cubierta del Hospital de Traumatología, Rehabilitación y Quemados que conecta con Urgencias en dos minutos", Nov. 26, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://hospital.vallhebron.com/es/actualidad/noticias/vall-dhebron-estrena-nuevo-helipuerto>

[-en-la-cubierta-del-hospital-de-traumatologia-rehabilitacion-y-quemados-que-conecta-con-urgencias-en-dos-minutos](#). [Accedido: 30 nov. 2024].

[84] CASA SOLO arquitectos, "Nuevo Helipuerto Hospital Vall d'Hebron", Barcelona, España, [En línea]. Disponible en: <https://casasolo.es/proyectos/nuevo-helipuerto-hospital-vall-dhebron/>. [Accedido: 30 nov. 2024].

[85] Volocopter, "A Complete Guide to Certification (VoloCity Air Taxi Edition)", Dec. 7, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.volocopter.com/en/blog/how-one-volocopter-aircraft-is-being-prepped-to-soar>. [Accedido: 30 nov. 2024].

[6] Volocopter, "VOLOCITY: The air taxi that's a cut above", [En línea]. Disponible en: <https://www.volocopter.com/en/solutions/volocity>. [Accedido: 30 nov. 2024].

[87] Volocopter, "VoloCity Design Specifications 2024", [En línea]. Disponible en: https://assets.ctfassets.net/vnrac6vfvrab/126QfcvwGXCr1P3wDWEvVZ/5edbdba0a012c43d7cbd/8116740f63145/241023_SpecSheet_VoloCity.pdf. [Accedido: 30 nov. 2024].

[88] Lilium, "The Lilium Jet", [En línea]. Disponible en: <https://jet.lilium.com/>. [Accedido: 30 nov. 2024].

[89] Volocopter, "Volocopter Receives Green Light for VoloCity Serial Production", Feb. 29, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.volocopter.com/en/newsroom/vc-poa-extension>. [Accedido: 30 nov. 2024].

[90] The Electric VTOL News, "Lilium Revises Target to 2025 for Certification", Apr. 30, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://evtol.news/news/lilium-revises-target-to-2025-for-certification>. [Accedido: 2 dic. 2024].

[91] Y. Yemsi y B. Mandalia, "Path to certification of the 7-Seater Lilium Jet", Jun. 11, 2021, Lilium, [En línea]. Disponible en: <https://lilium.com/newsroom-detail/path-to-certification-of-the-7-seater-lilium-jet>. [Accedido: 2 dic. 2024].

[92] Joby Aviation, "Joby to Launch Air Taxi Service in UAE", Feb. 11, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-to-launch-air-taxi-service-uae/>. [Accedido: 2 dic. 2024].

[93] Joby Aviation, "Joby Completes Third Stage of FAA Certification Process", Feb. 21, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-completes-third-stage-faa-certification-process/>. [Accedido: 15 dic. 2024].

[94] J. Daleo, "FAA, EASA Release New Certification Criteria for Air Taxis", FLYING, Jun. 11, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.flyingmag.com/modern/faa-easa-release-new-certification-criteria-for-air-taxis/>. [Accedido: 15 dic. 2024].

[95] Grupo CT Scanner, "El hígado y sus funciones", Jun. 1, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://grupectscanner.com/funciones-del-higado/>. [Accedido: 19 dic. 2024].

- [96] C. Soteras, "L'Hospital Vall d'Hebron, en espera de l'heliport definitiu", Betevé, Jun. 30, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://beteve.cat/societat/hospital-vall-hebron-espera-heliport-definitiu/>. [Accedido: 19 dic. 2024].
- [97] S. Sarroca, "Aviació Civil obliga el Vall d'Hebron a reformar l'heliport per millorar-ne la seguretat", Betevé, Dec. 1, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://beteve.cat/societat/aviacio-civil-trasllat-heliport-lhospital-de-la-vall-dhebron/>. [Accedido: 23 dic. 2024].
- [98] Redacció, "A finals de febrer estarà enllestit el nou heliport provisional de l'Hospital Vall d'Hebron", Betevé, Feb. 1, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://beteve.cat/societat/heliport-provisional-vall-hebron/>. [Accedido: 23 dic. 2024].
- [99] Organización Nacional de Trasplantes, "Programa Marco de Calidad y Seguridad: Proceso de empaquetado y etiquetado", Nov. 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.ont.es/wp-content/uploads/2023/06/3.-2.-Proceso-de-empaquetado-y-etiquetado.pdf>. [Accedido: 23 dic. 2024].
- [100] R. Nay, "Joby Aviation: Joby S4 Aircraft (Production Prototype)", AeroCrunch, Jan. 11, 2025, [En línea]. Disponible en: <https://aerocrunch.com/joby-aviation-joby-s4-profile/>. [Accedido: 3 en. 2024].
- [101] Q. Uceda, "El nuevo helipuerto agilizará la asistencia a los pacientes críticos", La Vanguardia, Nov. 29, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/local/barcelona/20211129/7896045/nuevo-helipuerto-vall-d-hebron.html>. [Accedido: 3 en. 2024].
- [102] Ministerio de Fomento, "Real Decreto 1070/2015", BOE, núm. 285, Nov. 28, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2015/BOE-A-2015-12893-consolidado.pdf>. [Accedido: 3 en. 2024].
- [103] CNMC, "Término de facturación de energía del Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor de electricidad (PVPC)", [En línea]. Disponible en: <https://comparador.cnmc.gob.es/preciosPVPC/inicio/>. [Accedido: 7 en. 2024].
- [104] SMG Consulting, "How much does it cost to build a vertiport?", LinkedIn, [En línea]. Disponible en: https://www.linkedin.com/posts/smgconsultingllc_aam-advancedairmobility-uam-activity-7185685620596375553-Qv4D. [Accedido: 7 en. 2024].
- [105] A. Jha, N. Prabhakar, D. Karbowski, y B. German, "Urban Air Mobility: A preliminary case study for Chicago and Atlanta", ResearchGate, Jun. 2022, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/362966570_Urban_Air_Mobility_A_preliminary_case_study_for_Chicago_and_Atlanta#pf3. [Accedido: 7 en. 2024].
- [106] G. Suart, "Sustainable air transport – eVTOL operating costs under the microscope", Urban Air Mobility News, Nov. 5, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.urbanairmobilitynews.com/air-taxis/sustainable-air-transport-evtol-operating-costs-under-the-microscope/>. [Accedido: 7 en. 2024].