



universidad  
de León



**Escuela de Ingenierías**  
**Industrial, Informática y Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Trabajo de Fin de Grado

**SISTEMA, CONTROL Y PROTOTIPO eVTOL**  
**eVTOL SYSTEM, CONTROL AND PROTOTYPE**

Autor: Carmen Blanco Puente

Tutor: David Borge Diez

Julio, 2022

# UNIVERSIDAD DE LEÓN

Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

## GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Trabajo de Fin de Grado

**ALUMNO:** Carmen Blanco Puente

**TUTOR:** David Borge Diez

**TÍTULO:** Sistema, control y prototipo eVTOL

**TITLE:** eVTOL system, control, and prototype

**CONVOCATORIA:** Julio, 2022

**RESUMEN:** Hoy día, el aumento de la contaminación atmosférica y las obstrucciones constantes de las carreteras convencionales ha llevado al ser humano a la necesidad de buscar una solución más allá de la fabricación de coches eléctricos (ya que congestionan más dichas carreteras).

A estos inconvenientes se le suma la necesidad diaria que existe de movimiento en las ciudades. En este momento, se hace imprescindible la búsqueda de un transporte alternativo y eficiente, donde nace la idea de la aeronave eléctrica como transporte urbano e interurbano.

En concreto va a ser tratado lo conocido como eVTOL, acrónimo en inglés utilizado para referirse a vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical, de manera que no se necesaria una pista demasiado espaciosa para su correcto uso.

Existen problemas no resueltos en lo que se refiere a la infraestructura necesaria para el uso de dichas aeronaves, por lo que se va a comenzar estudiando alternativas menos complejas y más alejadas de la vida en ciudad, como es el abastecimiento o el rescate en zonas rurales, debido a que, al ser un medio de transporte mucho menos voluminoso que un helicóptero, podrá llegar a zonas a las que es más complicado.

El trabajo está estructurado en diferentes partes, siendo la primera una toma de contacto con lo que es y cómo funciona este medio de transporte, estudiando el control y la infraestructura de carga que implicaría su utilización en el mundo real.

En una segunda parte, el trabajo estará centrado en la adaptación e integración de esta aeronave a los distintos medios posibles, las dificultades del medio y estructurales con las que nos enfrentaríamos y posibles soluciones a las mismas.

Por último, el proyecto se centrará en el desarrollo y la construcción de un prototipo a escala lo más funcional posible para poder observar visualmente el funcionamiento y las capacidades que podría llegar a tener.

**ABSTRACT:**

Nowadays, the increase in air pollution and the constant obstruction of conventional roads has led to the need to look for a solution beyond the manufacture of electric cars (as they cause more congestion on these roads).

In addition to these inconveniences, there is a daily need for movement in cities. At this point, it becomes essential to search for an alternative and efficient transport, where the idea of the electric aircraft as urban and interurban transport is born.

Specifically, what is known as eVTOL, an acronym used to refer to vertical take-off and landing electric vehicles, will be dealt with, so that a runway that is not too spacious is not necessary for its correct use.

There are unresolved problems in terms of the infrastructure necessary for the use of such aircraft, which is why we are going to start studying fewer complex alternatives that are further away from city life, such as supply or rescue in rural areas, due to the fact that, being a much less bulky means of transport than a helicopter, it will be able to reach areas that are more complicated to reach.

The work is structured in distinct parts, the first one being a contact with what this means of transport is and how it works, studying the control and loading infrastructure that its use in the real world would imply.

In the second part, the work will focus on the adaptation and integration of this aircraft to the different possible environments, the environmental and structural difficulties that we would face and workable solutions to them.

Finally, the project will focus on the development and construction of a scale prototype that is as functional as possible in order to visually observe its operation and the capabilities it could have.

**Palabras clave:**

**Firma del alumno:**

**VºBº Tutor/es:**

# I Resumen

Hoy día, el aumento de la contaminación atmosférica y las obstrucciones constantes de las carreteras convencionales ha llevado al ser humano a la necesidad de buscar una solución más allá de la fabricación de coches eléctricos (ya que congestionan más dichas carreteras).

A estos inconvenientes se le suma la necesidad diaria que existe de movimiento en las ciudades. En este momento, se hace imprescindible la búsqueda de un transporte alternativo y eficiente, donde nace la idea de la aeronave eléctrica como transporte urbano e interurbano.

En concreto va a ser tratado lo conocido como eVTOL, acrónimo en inglés utilizado para referirse a vehículos eléctricos de despegue y aterrizaje vertical, de manera que no se necesaria una pista demasiado espaciosa para su correcto uso.

Existen problemas no resueltos en lo que se refiere a la infraestructura necesaria para el uso de dichas aeronaves, por lo que se va a comenzar estudiando alternativas menos complejas y más alejadas de la vida en ciudad, como es el abastecimiento o el rescate en zonas rurales, debido a que, al ser un medio de transporte mucho menos voluminoso que un helicóptero, podrá llegar a zonas a las que es más complicado.

El trabajo está estructurado en diferentes partes, siendo la primera una toma de contacto con lo que es y cómo funciona este medio de transporte, estudiando el control y la infraestructura de carga que implicaría su utilización en el mundo real.

En una segunda parte, el trabajo estará centrado en la adaptación e integración de esta aeronave a los distintos medios posibles, las dificultades del medio y estructurales con las que nos enfrentaríamos y posibles soluciones a las mismas.

Por último, el proyecto se centrará en el desarrollo y la construcción de un prototipo a escala lo más funcional posible para poder observar visualmente el funcionamiento y las capacidades que podría llegar a tener.

## II Abstract

Nowadays, the increase in air pollution and the constant obstruction of conventional roads has led to the need to look for a solution beyond the manufacture of electric cars (as they cause more congestion on these roads).

In addition to these inconveniences, there is a daily need for movement in cities. At this point, it becomes essential to search for an alternative and efficient transport, where the idea of the electric aircraft as urban and interurban transport is born.

Specifically, what is known as eVTOL, an acronym used to refer to vertical take-off and landing electric vehicles, will be dealt with, so that a runway that is not too spacious is not necessary for its correct use.

There are unresolved problems in terms of the infrastructure necessary for the use of such aircraft, which is why we are going to start studying fewer complex alternatives that are further away from city life, such as supply or rescue in rural areas, due to the fact that, being a much less bulky means of transport than a helicopter, it will be able to reach areas that are more complicated to reach.

The work is structured in distinct parts, the first one being a contact with what this means of transport is and how it works, studying the control and loading infrastructure that its use in the real world would imply.

In the second part, the work will focus on the adaptation and integration of this aircraft to the different possible environments, the environmental and structural difficulties that we would face and workable solutions to them.

Finally, the project will focus on the development and construction of a scale prototype that is as functional as possible in order to visually observe its operation and the capabilities it could have.

# III Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos del proyecto .....	2
1.2. Antecedentes .....	4
1.3. Movilidad aérea urbana.....	6
1.3.1. Problemática actual.....	7
2. AERONAVES eVTOL .....	12
2.1. Definición y funcionamiento.....	13
2.2. Clases de eVTOL .....	15
2.3. Requisitos.....	17
2.3.1. Ventajas y desventajas .....	19
3. SISTEMAS EN AERONAVES eVTOL.....	22
3.1. Infraestructura .....	22
3.1.1. Zonas de despegue y aterrizaje .....	23
3.1.2. Zona de circulación y estacionamiento.....	28
3.1.2.1. Dimensionamiento de zonas de un vertipuerto.....	29
3.1.3. Zona de pasajeros.....	32
3.2. Evitación de obstáculos.....	34
3.3. Sistema de control .....	36
3.3.1. Control autónomo: Tecnología fly-by-wire.....	37
3.4. Sistema de carga.....	40
3.4.1. Baterías .....	40
3.4.1.1. Baterías de litio .....	42
3.4.2. Cargador eficiente.....	43
3.4.3. Control óptimo multifásico.....	44
3.5. Sistema de propulsión .....	48
3.6. Normativa.....	49
4. APLICACIÓN DE LAS AERONAVES eVTOL .....	51
4.1. Integración como medio de transporte.....	51
4.1.1. Transporte de mercancía o paquetería .....	55
4.1.1.1. Infraestructura necesaria .....	57

4.1.1.2.	Ventajas y desventajas .....	60
4.1.2.	Transporte público eficiente: rutas predeterminadas .....	60
4.1.2.1.	Infraestructura necesaria .....	62
4.1.2.2.	Ventajas y desventajas .....	63
4.1.3.	Transporte diario en ciudad: servicio de “taxi” .....	64
4.1.3.1.	Infraestructura necesaria .....	65
4.1.3.2.	Ventajas y desventajas .....	67
4.1.4.	Transporte de enfermos: respuesta de emergencia .....	67
4.1.4.1.	Infraestructura .....	69
4.1.4.2.	Ventajas y desventajas .....	71
4.2.	Proyectos actuales en desarrollo y sus empresas fabricantes .....	72
4.2.1.	Empresa Lilium.....	73
4.2.2.	Empresa Joby Aviation .....	74
4.2.3.	Empresa EHang .....	76
4.2.4.	Empresa Volocopter .....	78
5.	DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO .....	81
5.1.	Análisis del sistema.....	81
5.2.	Análisis electrónico .....	82
5.2.1.	Esquema electrónico .....	83
5.2.2.	Componentes .....	85
5.2.3.	Flujograma de operaciones .....	91
5.2.3.1.	Proceso de despegue .....	92
5.2.3.2.	Proceso de aterrizaje .....	93
5.2.3.3.	Proceso de aterrizaje de emergencia .....	94
5.2.3.4.	Proceso de cambio de ruta .....	95
5.3.	Hardware de prototipo.....	95
5.3.1.	Estructuras mecánicas estudiadas .....	96
5.3.2.	Estructura mecánica final.....	99
6.	ESTUDIO ECONÓMICO Y DE MERCADO.....	100
6.1.	Estudio económico de desarrollo aeronave eVTOL .....	100
6.2.	Estudio económico de restauración de edificio.....	103
7.	CONCLUSIONES.....	106
	Lista de referencias bibliográficas .....	108

ANEXOS .....	114
Anexo I .....	114
Anexo II .....	116
Anexo III .....	117
Anexo IV .....	119
Anexo V .....	122
Anexo VI .....	124
Anexo VII .....	126
Anexo VIII .....	129
Anexo IX .....	135
Anexo X .....	136
Anexo XI .....	138

# IV Índice de figuras

Figura 1.1. Urbanización mundial en 1950 [5].....	6
Figura 1.2. Urbanización mundial en 2030 [5].....	7
Figura 1.3. Evolución de las emisiones de CO <sub>2</sub> en la UE [13].....	9
Figura 2.1. Precedente VTOL por Nikola Tesla, obtenido [15] .....	12
Figura 2.2.- Comparativa de ruido helicóptero-eVTOL [24] .....	18
Figura 3.1.- Diseño de elaboración propia de Vertihub .....	24
Figura 3.2.- Localización de Vertihubs, elaboración propia .....	24
Figura 3.3.- Diseño de elaboración propia vertiport.....	25
Figura 3.4.- Localización de Vertiports, elaboración propia.....	25
Figura 3.5.- Diseño de elaboración propia de Vertistation.....	26
Figura 3.6.- Ejemplo de localización de Vertistation, elaboración propia .....	26
Figura 3.7.- Esquema completo de tipos de vertipuertos, elaboración propia.....	28
Figura 3.8.- Descripción gráfica de SA, FATO y TLOF, elaboración propia.....	31
Figura 3.9.- Representación gráfica de la pendiente sin obstáculos, elaboración propia ....	32
Figura 3.10.- Anchura de superficie de ascenso en el despegue/aproximación con modificaciones propias [31] .....	35
Figura 3.11.- Dimensiones en vista lateral de una superficie de despegue/aproximación, elaboración propia .....	35
Figura 3.12.- Superficie de transición para FATO con procedimiento de aproximación PinS con un VSS .....	36
Figura 3.13.- Arquitectura del sistema Veronte 4x [35].....	39
Figura 3.14.- Tecnología actual de las baterías y evolución prevista [38] .....	41
Figura 3.15.- Comparativa de los diferentes sistemas de almacenamiento energético .....	42
Figura 3.16.- CONOPS bajo estudio de trayectoria .....	47
Figura 3.17.- Comparativa del consumo energético de cada CONOP [41] .....	48
Figura 4.1.- Desarrollo e integración de los diferentes tipos de servicio eVTOL, elaboración propia.....	53
Figura 4.2.- Volodrone .....	56
Figura 4.3.- EHang Falcon y gabinete inteligente [48] .....	57
Figura 4.4.- Entrega de paquetería a particular, elaboración propia.....	58
Figura 4.5.- Servicio de paquetería local, elaboración propia .....	59

Figura 4.6.- Ejemplo de rutas preestablecidas, Madrid. Elaboración propia.....	62
Figura 4.7.- Recordatorio de vertiport, elaboración propia .....	63
Figura 4.8.- Ejemplo de diseño estación taxi, elaboración propia.....	66
Figura 4.9.- eVTOL de Volocopter de transporte medicalizado [54] .....	69
Figura 4.10.- Construcción exterior de una estación de eVTOL medicalizado .....	70
Figura 4.11.- Vista en planta de estación ambulatoria, elaboración propia.....	71
Figura 4.12.- Comparativa de llegada entre distintas tecnologías de energía VTOL.....	72
Figura 4.13.- Lilium Jet [58] .....	74
Figura 4.14.- Joby Aviation S4 2.0.....	76
Figura 4.15.- eVTOL Ehang.....	77
Figura 4.16.- Volocopter Volodrone .....	78
Figura 4.17.- Volocopter VoloConnect .....	79
Figura 4.18.- Volocopter VoloCity.....	80
Figura 5.1.- Análisis electrónico sistema eVTOL, elaboración propia .....	83
Figura 5.2.- Análisis electrónico Veronte 4x, elaboración propia.....	84
Figura 5.3.- Diagrama de bloques Veronte 4x [70].....	88
Figura 5.4.- Disposición del conector.....	89
Figura 5.5.- Conector redundante de 68 pines Veronte 4x.....	90
Figura 5.6.- Esquema FOC [72] .....	91
Figura 5.7.- Diagrama de flujo proceso de despegue, elaboración propia .....	92
Figura 5.8.- Diagrama de flujo del proceso de aterrizaje, elaboración propia .....	93
Figura 5.9.- Diagrama de flujo del proceso de aterrizaje de emergencia, elaboración propia .....	94
Figura 5.10.- Diagrama de flujo del proceso de cambio de ruta, elaboración propia.....	95
Figura 5.11.- Dimensionamiento alas delanteras, elaboración propia.....	96
Figura 5.12.- Perfil aerodinámico alas delanteras, elaboración propia .....	97
Figura 5.13.- Dimensionamiento ala trasera, elaboración propia.....	97
Figura 5.14.- Dimensionamiento del fuselaje, elaboración propia.....	98
Figura 5.15.- Dimensionamiento de las hélices, elaboración propia.....	98
Figura 5.16.- Agrupación de diseño de eVTOL, elaboración propia .....	99
Figura 5.17.- Diseño final eVTOL, elaboración propia .....	99
Figura 6.1.- Elección de localización para la construcción de vertipuerto.....	103
Figura 6.2.- Datos catastrales de la parcela seleccionada.....	103

Figura 6.3.- Valoración de bienes urbanos en la Comunidad de Madrid .....	104
Figura IV.1.- Estacionamiento de helicópteros y zona de protección .....	119
Figura IV.2.- Puestos de estacionamiento de helicópteros .....	121

# V Índice de cuadros y tablas

Tabla 1.1. Ciudades en el mundo más congestionadas por el tráfico terrestre, adaptación [8] .....	8
Tabla 1.2. Ciudades españolas más congestionadas por el tráfico terrestre, adaptación [11]8	
Tabla 2.1.- Métodos de operación de los eVTOL, elaboración propia [22].....	16
Tabla 2.2.- Diseños eVTOL .....	20
Tabla 3.1.- Diferencias de necesidades de las zonas de despegue y aterrizaje.....	27
Tabla 3.2.- Dimensiones eVTOL Volocity [30].....	29
Tabla 3.3.- Dimensiones mínimas de rodaje aéreo y terrestre.....	30
Tabla 4.1.- Características principales del Volodron [45].....	56
Tabla 4.2.- Características de eVTOL de uso público, rutas predeterminadas .....	61
Tabla 4.3.- Características de un eVTOL de servicio taxi .....	65
Tabla 4.4.- Características del eVTOL Joby Aviation, basado en [59].....	75
Tabla 4.5.- Características del eVTOL Ehang, basado en [60] .....	77
Tabla 4.6.- Características de Volocopter Volocity, basado en [30].....	80
Tabla 5.1.- Características motor eléctrico MAGiDRIVE [66].....	85
Tabla 5.2.- Características técnicas Veronte 4x [69].....	87
Tabla 5.3.- Panel de conexión Veronte 4x.....	89
Tabla 5.4.- Características eléctricas controlador MC24 [73].....	91
Tabla 6.1.- Gastos e ingresos derivados por kilómetro y asiento .....	102
Tabla VIII.1.- Nomenclaturas proceso de cálculo de control óptimo multifásico .....	129
Tabla X.1.- Disposición de pines Veronte 4x.....	136

# VI Glosario de signos, símbolos, unidades, abreviaturas, acrónimos o términos

**ADS-B:** Sistema de Vigilancia Dependiente Automática.

**AEA:** All Electric Aircraft o aviones totalmente eléctricos.

**AEMA:** Agencia Europea del Medio Ambiente.

**ATC:** Control de Tráfico Aéreo.

**BLOS:** Beyond line-of-sight.

**BVI:** Interacción de vórtice de pala.

**CAN Bus:** Red de Área de Controladores.

**CONOPS:** Registro de condiciones de operación de un sistema.

**CTA:** Hora de Llegada Controlada.

**DEM:** Radiómetro de observación terrestre.

**DEP:** Sistema de Propulsión Eléctrica Distribuida.

**EASA:** Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea.

**eCTOL:** Conventional Take-off and Landing o despegue y aterrizaje convencional, modelo diferente de vehículo aéreo eléctrico.

**ESS:** Detección de Estrés Ambiental.

**eSTOL:** Electric Short Take-off and Landing o despegue y aterrizaje corto eléctrico, modelo diferente de vehículo aéreo eléctrico.

**FATO:** Área de aproximación final y de despegue, define el área en la que finaliza la fase final de aproximación hasta el vuelo estacionario o el aterrizaje.

**Fly by wire:** Sistema que envía en forma de señales electrónicas las ordenes procedentes del *side stick*.

**FOC:** Control Orientado al campo.

**FTS:** Tipo de procesador.

**GNC:** Guiado, Navegación y Control.

**GNSS:** Sistema Global de Navegación por Satélite.

**GPOTS, IPOPT:** Algoritmos de solución de trayectoria eficiente.

**HEMS:** Helicópteros de Servicio de Emergencia Sanitaria.

**IAS:** Velocidad aérea indiada.

**ICAO:** Organización de Aviación Civil Internacional.

**LIDAR:** Sistema de Medición y detección de objetos mediante Láser.

**LOS:** Line of Sight.

**LTE:** Long Term Evolution.

**M2M:** Machine to Machine.

**Maas:** Mobility as service o Movilidad como Servicio.

**MALE/HALE:** Media Altitud Larga resistencia, Gran Resistencia Gran Altitud.

**MEA:** More Electric Aircraft o más aviones eléctricos.

**NOx:** Término genérico que hace referencia a un grupo de gases muy reactivos.

**NVIS:** Night visión imaging system o sistema de imagen de visión nocturna.

**OACI:** Organización de Aviación Civil Internacional.

**OMS:** Organización Mundial de la Salud.

**PHP:** Pasajeros en Hora Punta.

**PID:** Control Proporcional Integral Derivativo.

**Plug and play:** Sistema que permite a un dispositivo ser conectado a un ordenador sin tener que configurar ni proporcionar parámetros a sus drivers.

**RTA:** Tiempo requerido de llegada.

**RTK:** Navegación cinética satelital

**SA:** Área de seguridad operacional de vertipuerto.

**TLOF:** Área de toma de contacto y elevación inicial de la aeronave.

**TOD:** Waypoint de Transición de Fase.

**UAM:** Urban Air Mobility, Movilidad Aérea Urbana.

**UAV:** Vehículo Aéreo no Tripulado.

**UAVs:** Vehículos aéreos no tripulados.

**UGV:** Vehículo Terrestre no Tripulado.

**USV:** Vehículo de Superficie no Tripulado.

**Vertiports:** Nombre que recibe el lugar de despegue y aterrizaje de los VTOL.

**VTOL:** Vertical Take-Off and Landing o despegue y aterrizaje vertical.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la sociedad en la que vivimos, el desarrollo de un nuevo método de transporte como sistema de movilidad alternativo es necesario. Hasta ahora, los aviones se han reservado para el transporte masivo de pasajeros y mercancías en rutas de larga distancia. Este medio de transporte, aun teniendo en cuenta sus ventajas por rapidez, está desfavorablemente condicionado por el coste de la fabricación y puesta en marcha de su infraestructura, el control del tráfico aéreo, la contaminación acústica y, sobre todo, el vertido de toneladas de gases contaminantes a la atmósfera, que aumenta hasta los 285 gramos de CO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido y pasajero [1].

La evolución tecnológica en el sector aeronáutico y electrónico que vivimos en el siglo XXI nos está permitiendo el desarrollo de muchos modelos de aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical. Este desarrollo está siendo reflejado en la inversión de centenares de emprendedores en todo el mundo con el objetivo de diseñar máquinas voladoras para sustituir o mejorar el transporte urbano, el transporte aéreo de cortas y medias distancias y otras aplicaciones que exigen rapidez, como el transporte de enfermos o la extinción de fuegos. Todos estos proyectos que están siendo desarrollados, tienen como objetivo último, la aplicación de dichas aeronaves en la vida cotidiana normal, para la sustitución de los automóviles actuales.

Existen muchos factores que están acercando a la sociedad al uso de aeronaves eléctricas como medio de transporte. Entre ellos podemos nombrar el crecimiento continuo de población y su concentración en las ciudades, lo que ha conllevado y seguirá haciendo, a la masificación de los centros urbanos, que a su vez provoca la congestión terrestre.

Como comentábamos, el principal factor para la modernización del transporte se debe a la contaminación atmosférica, cada vez más acusada en grandes ciudades. Debido a esto, nace la UAM, *Movilidad aérea urbana* [2], término que se refiere al uso de aeronaves de pequeño tamaño automatizadas para el transporte de pasajeros o carga en áreas urbanas e interurbanas, comprometido con el medio ambiente, y cuyo objetivo es conseguir un transporte completamente eléctrico que se espera que se convierta en una realidad en Europa en los próximos años. Dicha electrificación de los transportes no solo es beneficiosa para limitar los vertidos contaminantes, sino que los sistemas electrónicos tienen la ventaja de

pesar menos y, además, ser más seguros, ya que la probabilidad de fallo se reduce en gran medida.

Como en todo proyecto, nos enfrentamos con numerosas dificultades por el camino. Para empezar, dichas aeronaves deben cumplir ciertos requisitos para poder funcionar en un entorno urbano donde el espacio de operación es muy limitado, influyendo en las dimensiones que podrá tener la aeronave. La infraestructura que permitirá el despegue y aterrizaje de estas naves se conoce como vertipuerto, y será necesario hacerlo accesible tanto a los eVTOL como a los pasajeros utilizando el servicio, para ello, habrá que hacer un estudio sobre su localización, ya que tendrá uno de los mayores impactos para su integración.

Como se desarrollará a lo largo del proyecto, la Unión Europea, ha financiado el proyecto aEro, que estudia la viabilidad de la creación de los eVTOL. El resultado ha sido el diseño de un avión eléctrico VTOL con un ala basculante sobre la que serán situados los rotores. Aunque dicho proyecto cuente con numerosas ventajas, también cuenta con muchos inconvenientes, entre ellos, y siendo el mismo que existe actualmente con los coches eléctricos, es el volar transportando el peso de las baterías, lo que limita la autonomía. Esto y muchos otros problemas serán estudiados a lo largo de este proyecto.

### 1.1. Objetivos del proyecto

El desarrollo de medios de transporte aéreos de despegue y aterrizaje vertical eléctricos está cobrando mucha importancia en el mundo actual, se espera que en un periodo de tiempo relativamente corto se consiga proporcionar una movilidad a los pasajeros por el cielo en cortos periodos de tiempo y lo más cómoda posible.

En ámbito general, se trata de un proyecto de investigación y experimentación basado en los sistemas de control y carga y en el funcionamiento completo de la aeronave. También, nos centraremos en el diseño de un modelo de eVTOL lo más eficaz posible y respetando las normativas y los tamaños establecidos por la UAM. Por tanto, se tendrá tenido en cuenta las características de la aeronave, las limitaciones existentes en el mundo actual, las posibles utilidades de este y, el diseño y construcción de un pequeño prototipo que nos permita visualizar su funcionamiento. Para terminar, será realizado un estudio de mercado que nos refleje el presupuesto necesario para su realización, ya que puede que no sea muy eficiente

desde el punto de vista económico, pero la necesidad social y medioambiental de estos servicios es muy fuerte.

En comparativa con un helicóptero, un eVTOL tiene la misma capacidad de despegue y aterrizaje, y, aunque el helicóptero tenga una mayor autonomía y capacidad de pasajeros, el eVTOL consta de muchas otras mejoras, que se convierten en objetivos a alcanzar. Estas ventajas incluyen un alto grado de seguridad, bajos costes de explotación y un nivel de ruido muy disminuido.

En cuanto al alto grado de seguridad, debido al uso por completo de la electrónica y la automatización de los controles, los eVTOL son mucho más sencillos de maniobrar y menos posibilidades de errores humanos. Además de la simplificación de la estructura en comparación a la de un helicóptero.

Comentando los bajos costes de explotación, a la hora de electrificar la aeronave, se eliminaría un mecanismo de rotación y un sistema de combustible muy complicado, por lo que se verían reducidos los costes de mantenimiento. Según estima la empresa estadounidense Uber Technologies, el coste de mantenimiento de un helicóptero es aproximadamente el 60% de su coste de explotación, mientras que, en un eVTOL, puede reducirse al 20%.

Con respecto al nivel de ruido, se espera que sea de aproximadamente una cuarta parte debido a la completa electrificación y al empuje de la aeronave. Este es uno de los principales factores de aceptación del eVTOL como medio de movilidad urbana.

Podemos concluir los objetivos del proyecto diciendo el proyecto cubrirá:

- El análisis de la problemática actual respecto a la creciente movilidad aérea urbana.
- El estudio de las características generales y el funcionamiento de las aeronaves eVTOL, sus numerosas ventajas y limitaciones como las comentadas anteriormente.
- Estudiar y diseñar una infraestructura, un sistema de control y de carga para la aplicación de estas aeronaves en el mundo real.
- Analizar las distintas aplicaciones que podría llegar a tener y la forma de implementación de cada una de ellas.
- Diseñar y construir un prototipo a escala para la visualización del proyecto.
- Construir un estudio de mercado que nos permita llegar a conocer el grado de inversión necesaria para la puesta en marcha de un proyecto de esta envergadura.

## 1.2. Antecedentes

En este punto cabe mencionar los propios VTOLs anteriores al que va a ser estudiado y diseñado en este trabajo de fin de grado. Existe una variedad muy amplia en la cual son basados los nuevos y mejorados diseños, y todos ellos serán profundamente mencionados y explicados posteriormente.

En principal antecedente del eVTOL estudiado en este proyecto, es el helicóptero, el VTOL más conocido. Este medio de transporte es la solución actual a la movilidad aérea, es un sistema que transporta personas y mercancías eficazmente en medias y cortas distancias y con capacidad de despegue y aterrizaje vertical. Han sido utilizados desde la década de 1950 como taxi aéreo hasta la actualidad, siendo las principales empresas BLADE, Uber y Voom, aunque todas ellas tienen la intención de realizar la transición a eVTOL cuando el momento sea idóneo.

Comentando el funcionamiento de los helicópteros convencionales, son propulsados por un rotor principal (horizontal) y uno de cola. El rotor horizontal, que puede contar con dos o más palas ayuda al helicóptero a subir, bajar, avanzar y retroceder y el rotor de cola sirve para girar hacia los lados. Fue este desarrollo de modelos VTOL lo que consiguió que el concepto “coche volador” se intentase llevar a la práctica.

La principal cuestión que surge en este punto es por qué desarrollar un dispositivo que funciona de manera relativamente similar al helicóptero tradicional y qué beneficios puede implementar el eVTOL frente a los que un helicóptero no puede competir. La razón principal es la seguridad. Los aviones VTOL en desarrollo se caracterizan típicamente por sus sistemas de múltiples rotores altamente redundantes y su flexibilidad, lo que significa que el nuevo equipo tiene un alto grado de estabilidad y una baja probabilidad de fallo porque incluso cuando se apagan varios motores, también pueden volar. Técnicamente, los aviones VTOL utilizados en la UAM son más simples y eficientes que los helicópteros, tratando de evitar el uso de sistemas de control mecánico complejos para garantizar una funcionalidad robusta y sistemas de control integrados *fly-by-wire*.

Por otra parte, como ya ha sido comentado varias veces en el desarrollo de este proyecto, el principal factor diferenciador de un vehículo eVTOL es la **energía eléctrica**. Esta, es mucho más barata y limpia que operar con una turbina de gas. Para hacernos una idea práctica, por el mismo precio de una hora de combustible para un helicóptero, un eVTOL podría volar cerca de 4000km [3].

Ya no solo hablando del beneficio económico que supondría la electrificación del medio de transporte aéreo, si bien es posible que la electricidad del eVTOL no se genere al 100% de manera sostenible, la electrificación de la movilidad aérea seguirá creciendo, y, de cualquier forma, las operaciones eléctricas reducen las emisiones de carbono en el punto de operación.

Existen otros muchos beneficios comparando los dos medios de transporte, como son [4]:

- La **contaminación acústica**, ya que es uno de los principales inconvenientes a los que nos enfrentamos en la implementación de un vehículo aéreo. Las empresas fabricantes de eVTOL priorizan la reducción del impacto del ruido como una característica clave en su diseño, y lo consiguen mediante la electrificación de la planta de energía, mediante lo que se consigue una gran reducción sonora de la turbina, y mediante el aprovechamiento de los sistemas de propulsión originales, implementando rotores más pequeños que en conjunto emiten menos ruido que el sistema de rotor único de un helicóptero.
- **La seguridad**, su aumento se debe a no solo un factor de implementación en el diseño del eVTOL. Para empezar, el cambio de un solo rotor con el que cuenta un helicóptero, a la aparición de la propulsión distribuida, sistema en la velocidad de cada rotor es controlada independientemente, se mejora considerablemente la calidad de manejo en caso de la producción de una anomalía o fallo en uno de los rotores. Una de las principales características de este medio de transporte, es la implementación del control autónomo de vuelo, mediante el cual se reducen los riesgos asociados al error humano.
- **El coste de fabricación**, en general, la fabricación de un helicóptero es compleja y muy costosa, y en el mundo del eVTOL lo es también, pero en este segundo caso, la mayoría de sus sistemas de propulsión son *plug-and-play*, un sistema que nos permite conectar cualquier dispositivo de hardware al ordenador sin la necesidad de incorporar ningún driver, ya que la configuración es realizada automáticamente. Esto se traduce en la eliminación de transmisiones, ya que los ejes de transmisión de los motores eléctricos van conectados directamente a las aspas del ventilador, y, por tanto, en el abarato de los costes de fabricación.

### 1.3. Movilidad aérea urbana

En este apartado vamos a comentar cómo han ido y continúan creciendo las ciudades y el uso de vehículos personales con el paso de los años y las repercusiones negativas que esto conlleva.

Existe una tendencia a nivel mundial desde hace unos años a la actualidad, en la que las personas tienden a trasladarse a ciudades en busca de trabajo y oportunidades. En los gráficos expuestos a continuación se puede ver cómo este hecho es real y cada vez mayor.

En la siguiente comparativa entre la urbanización mundial entre los años 1950 y lo que suponemos será en 2030, podemos observar como la vida en un ambiente rural disminuye más de un 30% y las grandes ciudades (megaciudades), crecen desde un 0.9% hasta un 8.6%:

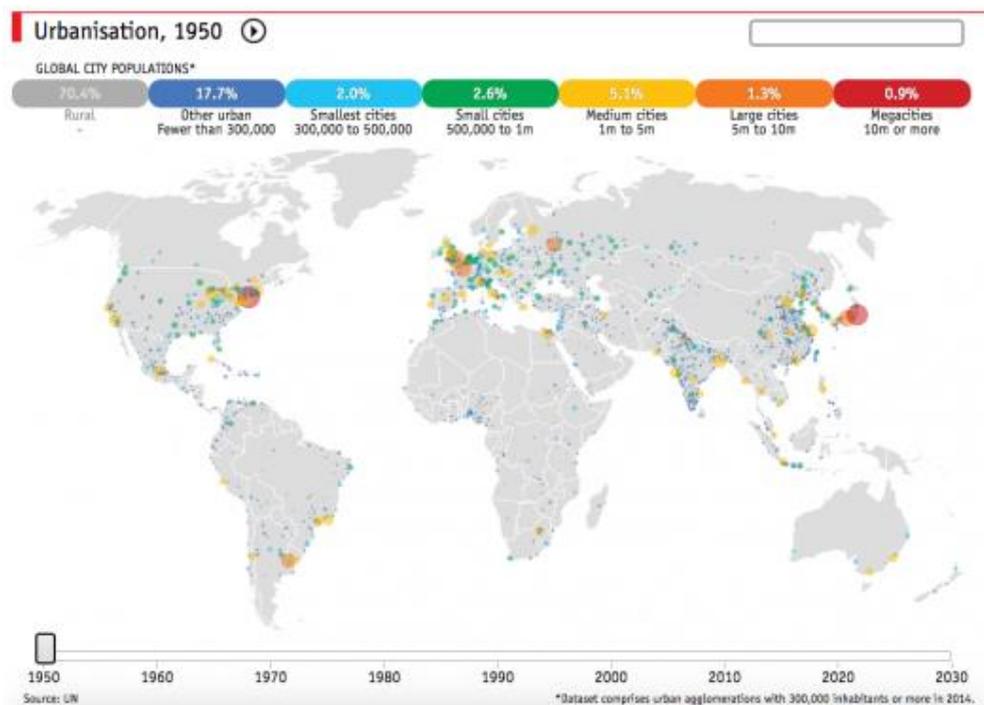


Figura 1.1. Urbanización mundial en 1950 [5]

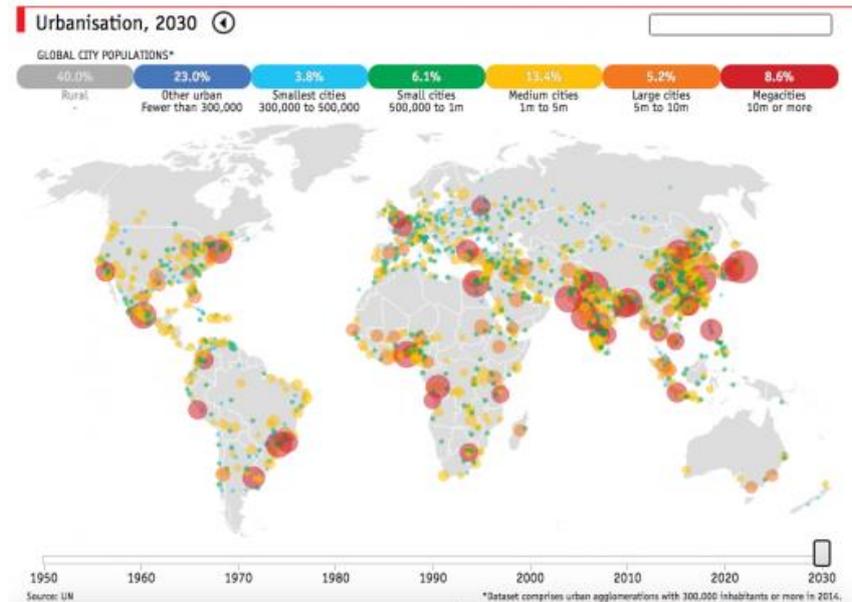


Figura 1.2. Urbanización mundial en 2030 [5]

Como fue comentado anteriormente, este crecimiento masivo de las ciudades conlleva varias repercusiones negativas que afectan sobre manera a la infraestructura terrestre disponible en dichos espacios, la cual es insuficiente y acarrea la aparición de una mayor congestión vehicular que la que llevamos viviendo varias décadas.

### 1.3.1. Problemática actual

Como se ha empezado a comentar en el punto anterior, el crecimiento masivo de ciudades lleva implícito la aparición de numerosos problemas, entre ellos, la provocación de copiosos atascos debido a la inexistencia de un sistema de infraestructura vehicular capaz de absorber y remediar la demanda producida en horas punta por los usuarios de los transportes.

Mundialmente hablando, la movilidad es el factor más importante al que se enfrentan las personas en las ciudades, siendo el correcto control del tráfico el principal reto. Como vamos a poder observar en las siguientes tablas, el sistema de carreteras no está lo suficientemente bien preparado como para poder evitar congestiones en horas punta [6].

En primer lugar, centrándonos en un ámbito mundial, vemos representada la completa necesidad de un cambio importante en la movilidad urbana, ya que, según un estudio realizado por *TomTom Traffic Index*, en las ciudades a continuación, las personas tardan un 90% más del tiempo en llegar a su destino de lo que deberían [7].

Tabla 1.1. Ciudades en el mundo más congestionadas por el tráfico terrestre, adaptación [8]

<b>Ciudad</b>	<b>Congestión 2019</b>	<b>Congestión 2020</b>	<b>Congestión 2021</b>	<b>Congestión en hora punta</b>
<b>Moscú (Rusia)</b>	54%	50%	61%	118%
<b>Kiev (Ucrania)</b>	53%	51%	56%	101%
<b>Bogotá (Colombia)</b>	68%	53%	55%	98%
<b>Ciudad de México</b>	52%	36%	38%	97%
<b>Estambul (Turquía)</b>	55%	51%	62%	96%
<b>Yakarta (Indonesia)</b>	53%	36%	34%	92%
<b>Bangkok (Tailandia)</b>	59%	44%	53%	85%
<b>Bucarest (Rumania)</b>	48%	58%	50%	73%
<b>Dublín (Irlanda)</b>	34%	24%	36%	70%
<b>Mumbai (India)</b>	65%	53%	53%	34%

Considerando la tabla anteriormente expuesta, por ejemplo, un ciudadano bogotano tardaría en llegar a su destino un 98% más del tiempo requerido en hora punta [9]. Bien cierto es, que, hablando a nivel español, nos encontramos muy alejados de los primeros puestos del ranking comentado, pero, aun así, como veremos en la tabla expuesta a continuación, se debe considerar un problema de igual manera [10].

Tabla 1.2. Ciudades españolas más congestionadas por el tráfico terrestre, adaptación [11]

<b>Ciudad</b>	<b>Congestión 2019</b>	<b>Congestión 2020</b>	<b>Congestión 2021</b>	<b>Congestión en hora punta</b>
<b>Barcelona</b>	29%	22%	26%	48%
<b>Granada</b>	25%	20%	22%	52%
<b>Sta Cruz de Tenerife</b>	23%	18%	20%	46%
<b>Valencia</b>	20%	17%	19%	39%
<b>Palma de Mallorca</b>	24%	16%	22%	34%
<b>Santander</b>	17%	16%	16%	27%
<b>Murcia</b>	21%	16%	17%	36%
<b>A Coruña</b>	19%	15%	16%	34%
<b>Las Palmas</b>	18%	15%	17%	42%
<b>Madrid</b>	23%	15%	22%	33%

Como ya ha sido introducido, en la actualidad, el problema más grave es la contaminación del planeta por la utilización masiva de combustibles fósiles, lo que también afecta al aire que respiramos en las ciudades, debido a que el CO<sub>2</sub>, los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y las partículas (PM), son contaminantes atmosféricos altamente nocivos para la salud. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), organismo internacional dedicado a la gestión de políticas de prevención, promoción e intervención de la salud, en la mayoría de las ciudades se superan constantemente los valores especificados [12].

Además, según la Agencia Europea del Medioambiente, se producen más de 400.000 muertes prematuras en Europa y 30.000 en España por la contaminación atmosférica provocada por el uso de combustibles fósiles. En la Unión Europea, tan solo los transportes de carretera expulsan el 72% de las emisiones de CO<sub>2</sub> anualmente, siendo este el único medio de contaminación que continúa creciendo cada año como podemos observar en el siguiente gráfico estudio realizado por la AEMA, Agencia Europea del Medio Ambiente encargada de proporcionar información independiente sobre el medio ambiente, en el año 2019 [13].

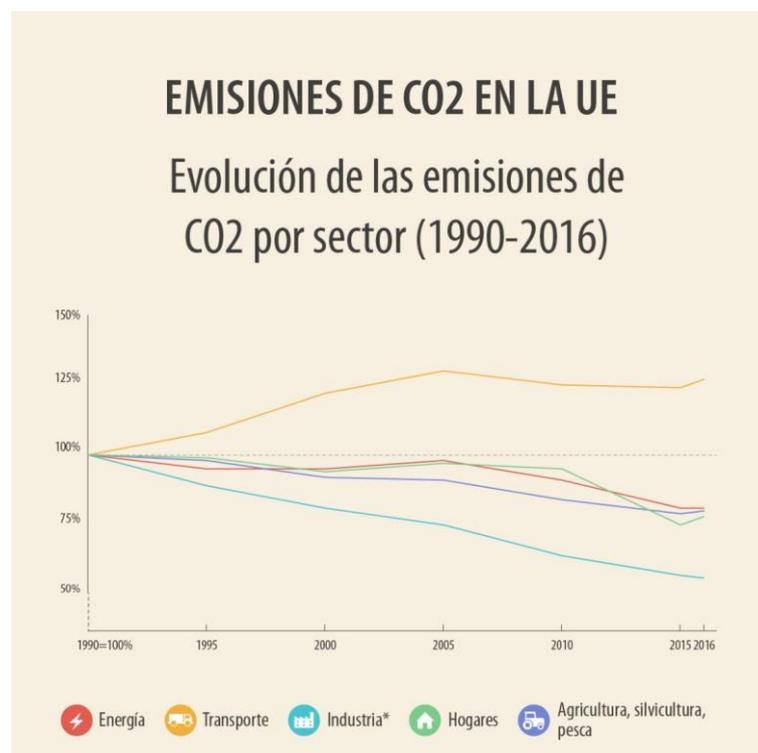


Figura 1.3. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la UE [13]

Tan solo centrándonos en el uso del coche particular, esta utilización es la responsable del 13% de la contaminación anual en los países de la Unión Europea. Si además contásemos también con el uso del transporte de mercancías, este porcentaje de dispararía. Es por esto por lo que los gobiernos y agencias europeos, están tomando medidas inmediatas para la reducción de emisiones contaminantes.

Por todo lo comentado anteriormente, la congestión en las grandes ciudades y la, cada vez más preocupante, contaminación atmosférica, es imprescindible el desarrollo de una nueva alternativa de transporte eficiente y sostenible en los núcleos urbanos. Es en este momento en el que aparece la Urban Air Mobility (UAM), proponiendo un diseño revolucionario que podría permitir el transporte a corta y media distancia de pasajeros y mercancía.

Como es comprensible, la UAM se encuentra también con numerosos desafíos en la implementación de estas aeronaves.

El principal desafío con el que nos encontramos en este punto es la creación y uso de baterías de alta capacidad que nos permitan operaciones de movilidad aérea urbana sin interrupciones. Hasta donde han sido desarrolladas en la actualidad, los eVTOL nos permiten impulsar vuelos en distancias cortas, por lo que, para poder garantizar una mayor libertad operativa, es necesario un mayor desarrollo de almacenamiento de energía.

Otro problema inminente, es la falta de espacios y de disponibilidad de sitios de aterrizaje, también llamados Vertiports [14]. Las ciudades que vayan implementando este tipo de transporte urbano, necesitarán contar con las infraestructuras necesarias para la creación de vertipuertos públicos. Además, cabe destacar la necesidad de crear un nuevo sistema de control de tráfico aéreo similar al existente y utilizado con los helicópteros.

Para concluir lo comentado, transformar el transporte en diferentes áreas urbanas es hoy una de las fronteras importantes de la aviación moderna. El transporte aéreo urbano es uno de los sistemas aéreos más eficientes para la carga y los pasajeros aéreos debido a la necesidad de reducir la congestión de los taxis urbanos en muchas ciudades densamente pobladas de todo el mundo.

También tiene como objetivo mejorar la seguridad al tiempo que ofrece una oportunidad sostenible, ya que los avances en motores y generadores hacen que los vuelos eléctricos sean más asequibles.

Si bien aún puede haber algunos problemas por resolver, los viajes aéreos parecen ser una opción de viaje prometedora que la mayoría de las principales ciudades del mundo están considerando seriamente.

## 2. AERONAVES eVTOL

Pese a estar considerando los medios de transporte VTOL como una novedad en la actualidad, dispositivos con las mismas características se han utilizado desde el siglo pasado. Siendo su primera aparición en el año 1928 con Nikola Tesla. Este famoso inventor anunció que había inventado lo que él llamó *helicopter-airplane*, avión que podía despegar y aterrizar verticalmente. Este artefacto nunca llegó a volar, pero significó un precedente de lo que es hoy en día un transporte que se encuentra en su mayor época de crecimiento [15].

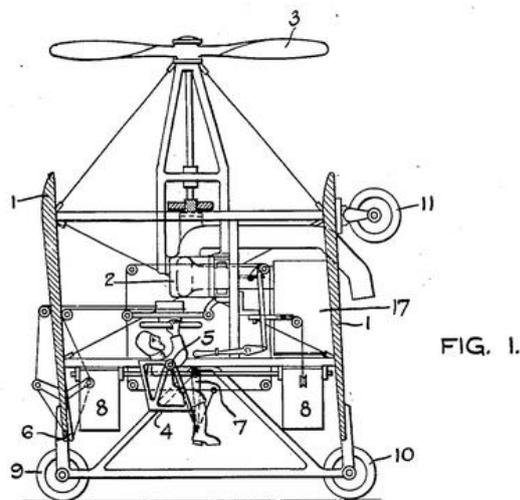


Figura 2.1. Precedente VTOL por Nikola Tesla, obtenido [15]

Se considera que el momento que proporcionó el impulso definitivo a este tipo de aeronaves fue la Segunda Guerra Mundial, ya que, en la década de los 50, se empezó a introducir este diseño de despegue y aterrizaje vertical a cazas militares, los cuales no contaban siempre con largas pistas para poder operar. Durante el transcurso de estos años, muchos otros diseños aparecieron, pero muchos no fueron construidos y otros fueron decepcionantes y cancelados.

La UAM (*Movilidad Aérea Urbana*), considera uno de los principales factores para la inclusión de las aeronaves VTOL las limitaciones de espacio en grandes urbes altamente edificadas. Estas restricciones a la hora de la construcción de las instalaciones necesarias para la integración de estos nuevos medios de transporte se tendrán en alta consideración a la hora del diseño de las aeronaves y de sus puestos de despegue, aterrizaje y carga.

Si consideramos dichos problemas encontrados en grandes ciudades, nos encontramos con la obviedad de que los dispositivos VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*), son los idóneos por su capacidad para utilizar el menor espacio posible [16].

Como ya ha sido comentado anteriormente, sin lugar a duda, la aeronave más conocida del grupo VTOL es el helicóptero. Está propulsado por dos hélices, una hélice principal ubicada en la parte superior central, que hace que la aeronave pueda ascender en el despegue, y un rotor de cola contrarrotante responsable de contrarrestar el par. La investigación sobre helicópteros había estado en curso desde principios de la década de 1920, pero no fue hasta 1942 que Sikorsky diseñó y construyó el primer helicóptero controlado en vuelo producido en masa.

Este gran desarrollo y utilidad de los modelos VTOL, hizo que el concepto de transporte o coche volador dejase de ser una utopía y se intensase llevar a la práctica. Como fue comentado, en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial, muchos ingenieros desarrollaron proyectos similares, pero finalmente, ninguno llegó a ser producido en masa. No ha sido hasta las últimas décadas cuando las aeronaves VTOL han experimentado un verdadero crecimiento eficiente considerando todos los retos a los que se está teniendo que enfrentar la UAM.

De esta manera, conceptos como **MEA** (More Electric Aircraft) [17] cuya definición y último objetivo es conseguir un avión completamente eléctrico, el **AEA** (All Electric Aircraft) [18] término que contempla la utilización de energía eléctrica para todos los sistemas propulsores y no propulsores y, el ya comentado, control **fly-by-wire** que son sistemas de control de que reemplazan los controles de vuelo mecánicos con una interfaz electrónica, están cobrando cada vez más importancia.[19]

## 2.1. Definición y funcionamiento

eVTOL es la abreviatura de despegue y aterrizaje eléctrico. VTOL, como comentado, es un término genérico que describe helicópteros y aviones de rotor basculante que aterrizan y despegan verticalmente en lugar de rodar por una pista. La “e” significa que la nave funciona con electricidad en lugar de con motores de combustión interna más tradicionales.

Básicamente, cada dron existente de consumo moderno (DJI, Skydio) son eVTOL en miniatura. Estos drones son excelentes para el transporte de pequeñas cargas, como vacunas, pero ahora los eVTOL cada vez son más grandes y con capacidades mucho mayores. De esta forma, pueden revolucionar la forma en que los paquetes y las personas se trasladan de un lugar a otro [20].

Cuando se trata de **mecánica de vuelo**, muchos diseños funcionan sin alas. Los multicópteros suelen utilizar bastidores radiales para el almacenamiento de motores/hélices. El diseño del vector de empuje redirige el empuje verticalmente durante el despegue/aterrizaje y horizontalmente durante el vuelo de crucero. Puede girar toda la pala (palas basculantes) o solo las hélices (rotor basculante). También hay otros aviones convertibles. O, por ejemplo, el ASML Aero Vertia utiliza un híbrido que gira la base del rotor principal en su ala de caja fija. Otro enfoque para la vectorización de empuje es usar flaps para dirigir el aire desde el motor horizontal hacia abajo para generar sustentación.

- Las configuraciones de ala basculante hacen pivotar toda el ala junto con sus motores acoplados.
- Los sistemas de elevación y crucero utilizan un juego de motores para vuelo vertical y el otro para vuelo de crucero.
- El diseño híbrido utiliza un número fijo de motores y otros basculantes.

En términos de diseño y uso de las **alas**, las máquinas típicas de propósito general no usan alas, sino que se basan únicamente en palas giratorias para levantar.

Los diseños de alas en tándem utilizan alas delanteras y traseras, opcionalmente unidas entre sí en las puntas de las alas. Las alas de caja o cerradas también usan dos alas, pero se unen de manera que excluyen las puntas de las alas. Estas pueden plegarse verticalmente o colocarse delante y detrás, como en estructuras paralelas.

Finalmente, cuando se trata de **potencia**, la mayoría de los diseños actuales funcionan con baterías, aunque algunos usan celdas de combustible de hidrógeno. Actualmente, la batería tiene una energía específica baja (lo que provoca problemas con el piloto automático y, por lo tanto, compromete la seguridad). Las celdas de combustible anteriores tenían densidades de potencia más bajas (quizás demasiado bajas para el despegue/aterrizaje vertical), pero los hallazgos más recientes afirman haber resuelto este problema con densidades de potencia más altas. También hay propuestas para utilizar baterías de despegue/aterrizaje y celdas de combustible de hidrógeno para vuelos programados.

Gracias a los grandes avances recientes de los motores eléctricos y la ampliación de la capacidad de las baterías, los aviones eléctricos nunca habían sido más viables. Combinando motores eléctricos con hélices y grandes baterías, las aeronaves eVTOL puede llegar a transportar mercancías y pasajeros de forma eficiente y segura hasta 400 km con una carga.

## 2.2. Clases de eVTOL

Distinguimos principalmente tres métodos diferentes en la forma de operar un eVTOL:[21]

- El método considerado más básico o sencillo es el de **multirotor**, que funciona como un dron genérico, con múltiples rotores fijos que permiten la elevación hacia arriba y el empuje necesario para moverse hacia delante es conseguido mediante la inclinación del vehículo. Las hélices con las que está compuesto este tipo de diseño, permiten equilibrar los momentos girando en sentidos opuestos y manteniéndose en posición fija durante todo el vuelo. Estas características se traducen en el método ideal para el vuelo estacionario, pero no los convierte en la mejor opción durante el crucero, teniendo una máxima velocidad de 90km/h y un alcance no mayor a los 50km. Aun sabiendo todas estas desventajas, se siguen considerando una muy buena alternativa a los helicópteros convencionales por la reducción de ruido y emisiones y el aumento de la redundancia, la cual se consigue debido a que cada hélice presenta un sistema eléctrico independiente. Se presupone que será un tipo de aeronave utilizada en rutas preestablecidas de vuelos interurbanos debido a su alcance limitado.
- Otro método es el de **elevación y crucero**, en el que varias hélices proporcionan elevación como un helicóptero, mientras que un segundo motor fijo proporciona propulsión hacia delante. Combina la configuración de multirotor comentada anteriormente con otra hélice de eje horizontal, de forma que le confiere un empuje directo en la dirección del vuelo. Este tipo de aeronave alcanza velocidades de hasta 250km/h y un alcance de hasta 200km. Es cierto que son considerablemente más complejas que las anteriores y el tiempo de certificación, por tanto, será mayor. Al contrario que el método de multirotor, los eVTOL de elevación y crucero, nos permitirían abarcar cualquier tipo de ruta, urbana o interurbana.
- Por último, existe el método de **inclinación y empuje**, utilizado en naves como la V-22 Osprey y Joby

- Aviation, que comentaremos más adelante. En este último caso, también denominado empuje vectorial, las hélices pueden cambiar de posición, de manera que bien pueden proporcionar toda la sustentación necesaria a elevar la aeronave durante la maniobra de despegue vertical, o bien, proporcionarla para moverla hacia delante. Esto genera una propulsión, mientras que las alas más tradicionales proporcionan sustentación. Se trata del método más complejo pero el que, también, nos proporciona las mayores posibilidades, llegando a alcanzar velocidades de hasta 300km/h con un alcance de alrededor de 300km. Cada rotor debe disponer de su propio actuador, los que deben de ser completamente redundantes, esto se traduce en una producción mucho más costosa y con un proceso de certificación más lento, pero es la aeronave idónea para realizar trayectos entre distintas ciudades.

Tabla 2.1.- Métodos de operación de los eVTOL, elaboración propia [22]

Método	Figura explicativa	Características
Multirotor		<ul style="list-style-type: none"> <li>·La elevación es debida exclusivamente a las hélices.</li> <li>·Rotores fijos.</li> <li>·90km/h, autonomía 50km.</li> </ul>
Elevación y crucero		<ul style="list-style-type: none"> <li>·Las hélices son las responsables de la elevación.</li> <li>·Motor fijo para propulsión hacia delante.</li> <li>·Hélice horizontal para el empuje en vuelo de crucero.</li> <li>·250km/h, autonomía 200km.</li> </ul>
Inclinación y empuje		<ul style="list-style-type: none"> <li>·Las hélices cambian de posición, para despegue o movimiento hacia delante.</li> <li>·300km/h, autonomía 300km.</li> </ul>

Todos los métodos comentados tienen sus pros y contras, pero el último caso, de inclinación y empuje (**rotor basculante**), es, sin lugar a duda, la opción más popular entre las empresas actuales de desarrollo de eVTOL de transporte de personas y mercancía a largas distancias.

Se han comentado los procesos de certificación, el método de multirotor será el primero en introducirse al mercado debido a que dicho proceso será mucho más corto. Los otros dos comentados métodos, tendrán un desarrollo más lento, ya que, hoy en día, todavía no se han conseguido los estándares de seguridad necesarios para el transporte de personas en condiciones adversas.

### 2.3. Requisitos

Como ya se ha ido introduciendo a lo largo de este proyecto, aeronaves de estas características deben cumplir con numerosas particularidades para poder sobrevolar cualquier tipo de entorno urbano. También es necesario mencionar, que como en cualquier otro campo, las características que ofrecen actualmente estos dispositivos aún tienen mucho margen de mejora. Esta evolución es la que permitirá a estos transportes la correcta introducción en la UAM.

La mayoría de los aspectos que serán comentados a continuación estarán ligados a la seguridad, adecuada operación en tierra y la aceptación social:

- La **propulsión distribuida**, aun siendo un aspecto muy técnico, es de los conceptos que tienen en común todas las aeronaves y está completamente relacionado con una adecuada operación terrestre, ya que, gracias a esto, se mejora la maniobrabilidad y se permite un despegue y aterrizaje en un espacio mucho menor. No solo eso, sino que también, además de mejorar la eficiencia, se consigue una reducción de ruido. Se basa, principalmente, en la repartición del empuje entre los distintos rotores.
- Está previsto que las **baterías** sean el sistema principal de alimentación, y, hoy en día, es de lo que más problemas supone. Esto es debido a que, en términos de duración y densidad de energía, no proporciona la suficiente para la mayoría de las operaciones previstas para los eVTOL. Como será mencionado posteriormente, deberán ser tenidos en cuenta sistemas adicionales, como las pilas de hidrógeno. No obstante, en este punto cabe mencionar también las estaciones de carga rápida y la necesidad de disponer de una interfaz que permita una conexión rápida y adecuada.

- El **ruido** es de las principales razones por las que existe el rechazo hacia los helicópteros, es por esto por lo que la reducción de ruido ha sido un objetivo desde el inicio para los fabricantes de aeronaves eVTOL. Los niveles de ruido de estos dispositivos se encuentran en la actualidad por debajo de los 60dB, frente a los 119 de un helicóptero [23]. Las principales razones por las que un eVTOL es mucho más silencioso son [24]:
  - Velocidad de punta reducida, el ruido que produce esto es el que se puede visualizar de color azul en la imagen inferior, es el llamado ruido de espesor.
  - Menores necesidades de empuje y directividad óptima en crucero, lo cual se ve reflejado con el ruido de carga (rojo).
  - Evitación del BVI (interacción del vórtice de pala). Fenómeno generado debido a la velocidad de rotación de las palas originando turbulencias y un vórtice concentrado. De esta manera, cada vez que una pala pasa por este vórtice, se producen vibraciones y la energía acústica característica de un helicóptero.
  - Sistema de propulsión eléctrico

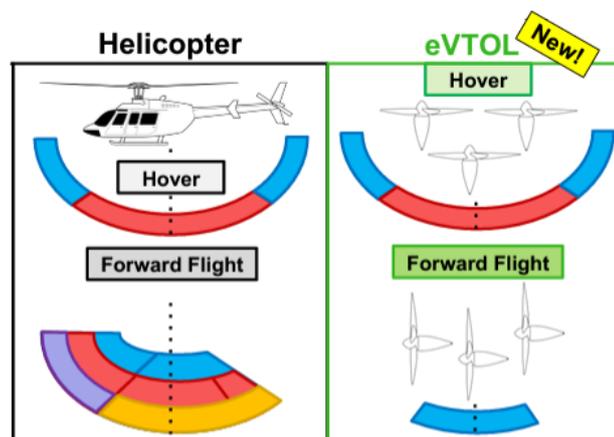


Figura 2.2.- Comparativa de ruido helicóptero-eVTOL [24]

- La **seguridad** es, probablemente, el aspecto más importante del diseño de eVTOL. Debido a la utilización de la propulsión eléctrica distribuida empleando múltiples rotores para el despegue y control de vuelo, se logran niveles de seguridad hasta 4 veces más altos que en los helicópteros.

- Existe la necesidad de un **sistema operativo autónomo** para que las operaciones que realizarán las aeronaves eléctricas sean completamente autónomas. Debe existir algún tipo de sistema de gestión que controle el tráfico aéreo, ya que se presupone que no existirá la necesidad de un piloto o controlador aéreo.
- **Disponibilidad**, tanto referida al alcance de la aeronave como a la capacidad de operar en condiciones adversas de baja visibilidad. Por un lado, va a ser imprescindible que estos transportes tengan un mínimo de 50km de autonomía si el uso es urbano, pero será necesario la garantía de un alcance mayor para, por ejemplo, operaciones de rescate. Por otro lado, las aeronaves eVTOL deben permitir el vuelo en condiciones de baja visibilidad producidas por cualquier fenómeno atmosférico (viento, lluvia), al igual que deben de poder operar tanto de día como de noche, por lo que será necesario un sistema de visión nocturna (NVIS).

### 2.3.1. Ventajas y desventajas

Cada vez más empresas fabricantes prometen la aparición de un taxi volador en un futuro cercano, normalmente tratándose de un VTOL (*vertical take-off landing*). Este tipo de aeronaves aportan muchas ventajas, pero si es cierto, que a la hora de desplazarse sus desventajas superan a las de un avión normal.

Para poder comentar estas razones, es necesario hablar de los diferentes tipos de aeronaves eléctricas que están surgiendo: eVTOL, eSTOL y eCTOL, modelos explicados a continuación [25].

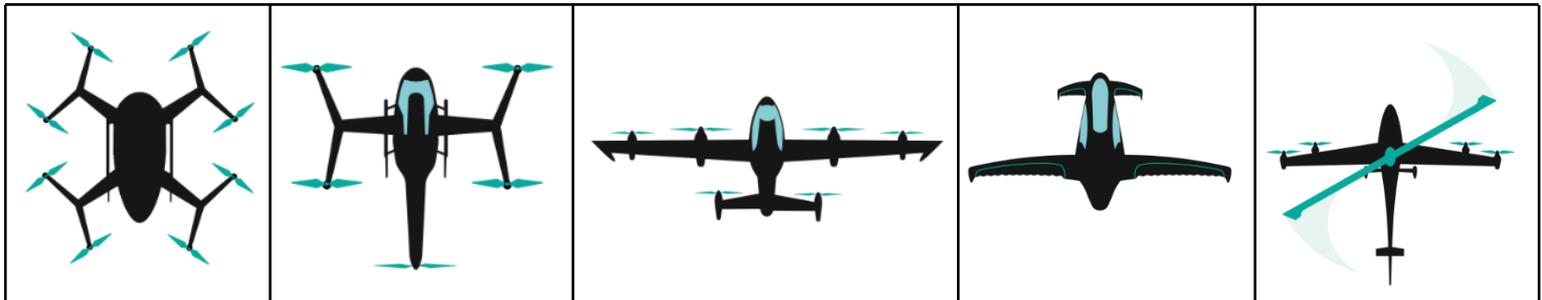
En primer lugar, la más conocida de todas y de la que trata este trabajo, eVTOL, es un vehículo idóneo para entornos urbanos debido al espacio que necesitan para sus maniobras. Dentro de este tipo de transporte, se pueden diferenciar varios modelos con sus ventajas y desventajas propias [26]:

- eVTOL de diseño ***Multicopter***, el más simple de todos ellos. No cuenta con alas, por lo que el consumo es mayor para poder compensar esta carencia, pero es el que menos ruido emite, por lo que lo hace perfecto para urbes en las que haya que emitir el menor estruendo posible.
- eVTOL de diseño ***Lift and Cruise***, en el que combina el diseño anterior a la hora de su despegue y aterrizaje con una aeronave convencional durante el vuelo. Tiene

muchas ventajas, ya que maximiza las capacidades de ambas arquitecturas, pero, debido al tipo de rotor utilizado, el ruido emitido es mucho mayor.

- eVTOL de diseño *Tilt Wing* y *Tilt Rotor*, este tipo de aeronave consigue minimizar el ruido emitido por la anteriormente comentada, ya que utiliza hélices de rotación lenta y abierta, pero los motores eléctricos requeridos son demasiado pesados.
- eVTOL de diseño *Deducted Vector Thrust*, al contrario que los otros diseños, utiliza ductos de fans en las alas, las cuales son fijas y controladas por un motor eléctrico para su función vertical y horizontal. Es uno de los diseños más eficiente y se considera la última generación de los eVTOL.
- eVTOL de diseño *Slowed Rotor Compound*, es un diseño completamente diferente a los vistos anteriormente, ya que el rotor principal es ralentizado, de manera que produce la menor resistencia con el aire, eliminando casi por completo el ruido.

Tabla 2.2.- Diseños eVTOL



Por otro lado, nos encontramos con las aeronaves eléctricas de tipo **eSTOL** (*Electric Short Take-off and Landing*), y su principal diferencia con los anteriores es el menor requisito de potencia en el despegue y aterrizaje. Pero su modo de actuación es completamente diferente a los eVTOL, ya que deben tomar velocidad previa a la elevación, su funcionamiento es similar al de un avión comercial cualquiera. Sus ventajas en comparación con los anteriores es principalmente el ahorro energético, ya que no necesitan de impulso de elevación en la misma medida que los eVTOL. Esto, técnicamente hablando, supone un esfuerzo mucho menor de desarrollo de baterías y mecánica.

Por último, vamos a comentar las aeronaves **eCTOL** (*Conventional Take-off and Landing*), son muy similares a las eSTOL, pero difieren en términos de rendimiento. Son, básicamente,

aeronaves actuales potenciadas completamente por motores eléctricos. Como ventaja podemos decir que requieren un desafío mucho menor, ya que no es necesario la creación de nuevos diseños, pero sí de motores suficientemente eficientes como para poder convertir una aeronave habitual de combustión a una completamente eléctrica.

### 3. SISTEMAS EN AERONAVES eVTOL

Han sido introducidas lo que son y lo que pueden llegar a ser las aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL), pilotadas y completamente autónomas para el transporte de personas o mercancía, pero lo que aún no ha sido comentado es que, no solo es necesario el diseño y la construcción de la propia nave, sino que es imprescindible el levantamiento de infraestructura en tierra y en aire.

No enfrentamos, por tanto, a uno de los mayores problemas con los que se encuentran las empresas fabricantes de las aeronaves, el diseño y la inclusión de la infraestructura necesaria para permitir este transporte de personas y mercancía, en zonas urbanas o suburbanas. Este problema surge debido a que no han sido establecidos aún los criterios a seguir para poder proceder a la fabricación de este sistema.

Es en este punto cuando introducimos un nuevo concepto, *Maas*, la **movilidad como servicio**, término que describe el alejamiento de la modalidad de transporte personal en vehículo propio hacia soluciones de movilidad como servicio, con el cual estamos ya familiarizados con empresas como Blablacar o Uber, consiste en pagar en función de kilometraje recorrido o tiempo de uso en vez de la adquisición de un vehículo propio.

Con este concepto introducido, podemos decir que, para que la movilidad aérea urbana se convierta en una realidad, se necesita establecer una gran infraestructura terrestre, un sistema de comunicación aérea y una plataforma que incluya la concepción de movilidad como servicio [27].

#### 3.1. Infraestructura

Otra de los pasos necesarios para poder integrar este vehículo a nuestra realidad, es la creación de un **concepto de operaciones** (CONOPS), documento que describe las características de un sistema propuesto, el cual registra las condiciones de operación de un sistema. Esta base se estableció para mejorar el uso de, en este caso, drones, en diferentes espacios, garantizando la seguridad de los sistemas de aviación existentes. La creación de CONOPS es de vital importancia en el marco de la creación de un Estudio Aeronáutico de Seguridad. La Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), agencia responsable de asegurar la seguridad y protección medioambiental en Europa, utiliza estos CONOPS para

adaptar los UAVs (vehículos aéreos no tripulados) en función del nivel de riesgo de sus operaciones. Este CONOPS debe incluir numerosas implementaciones de adaptación al entorno [28].

Desde el inicio del planteamiento de la inclusión de los eVTOL como transporte eficiente urbano, se ha considerado el escenario ideal, en el cual las zonas de despegue y aterrizaje de las naves se encuentran en zonas de aparcamiento y en azoteas de edificios altos. Pero, si realmente queremos que esto se convierta en una realidad, debemos asumir que no en todos los casos será así.

Al inicio de este proyecto, se comentó la superpoblación de las ciudades hoy en día, lo que se traduce en una descomunal limitación de espacio urbano y un elevado precio de inmuebles, por lo que no es tan descabellado asegurar, que es casi imposible poder construir únicamente espacios con varias zonas de aparcamiento. Esto lleva a los expertos a la división de las clases de configuración de pista, las cuales dependen de la disponibilidad del terreno, la utilización del espacio y la funcionalidad y, por tanto, ubicación de este.

A continuación, van a ser expuestas y comentadas las diferentes partes necesarias para la implementación de un transporte eVTOL, sus diferentes configuraciones, y el diseño de estas.

### 3.1.1. Zonas de despegue y aterrizaje

Como ya ha sido introducido, las pistas de despegue y aterrizaje han sido divididas en diferentes configuraciones según la disponibilidad, utilización, funcionalidad y ubicación del terreno. Por lo que es posible clasificar los *vertiplaces* de personas o mercancía en tres categorías, introducidas desde la de mayor tamaño a la de menor:

- **Vertihubs:** es el término utilizado para la comparación de los aeropuertos tal y como los conocemos aplicado a los eVTOL. Estarían situados en la periferia de las ciudades debido a sus grandes dimensiones. Con los vertihubs, no solo estamos hablando de un punto de recogida y entrega de personas y mercancía de viajes intraurbanos, sino también serían utilizados como ubicación central para que los eVTOL realicen vuelos a mayores distancias, vuelos interurbanos. Para ello, se contaría con al menos un vertihub en cada ciudad. Al estar hablando de una zona alejada del centro de una ciudad deberá estar equipada con lo necesario, se incluye

en este punto el concepto MRO (*Maintenance, Repair and Overhaul*), infraestructura necesaria para la realización de operaciones de mantenimiento, reparación y revisión de las aeronaves, así como espacio suficiente de aparcamiento e instalaciones específicas para el control de flujo de pasajeros y mercancía.

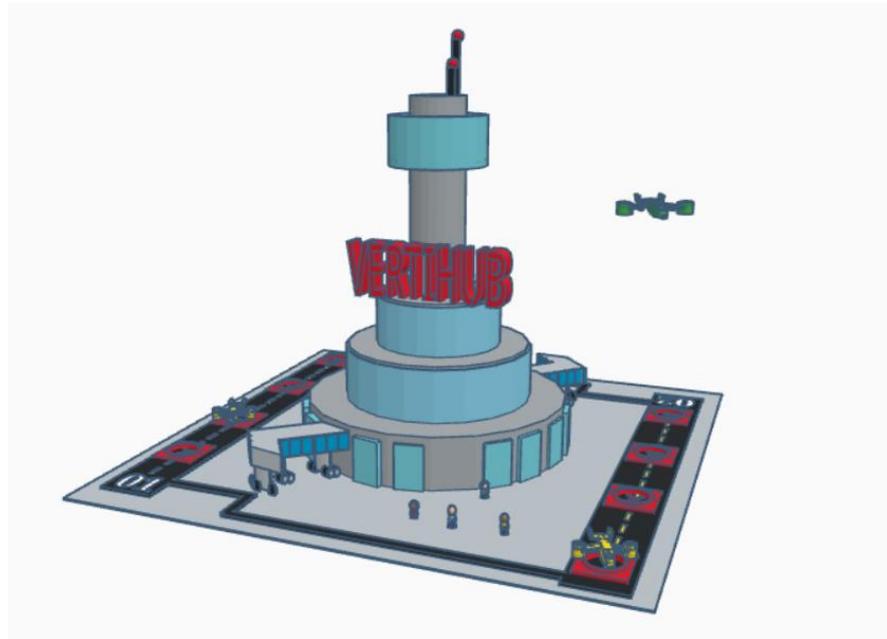


Figura 3.1.- Diseño de elaboración propia de Vertihub

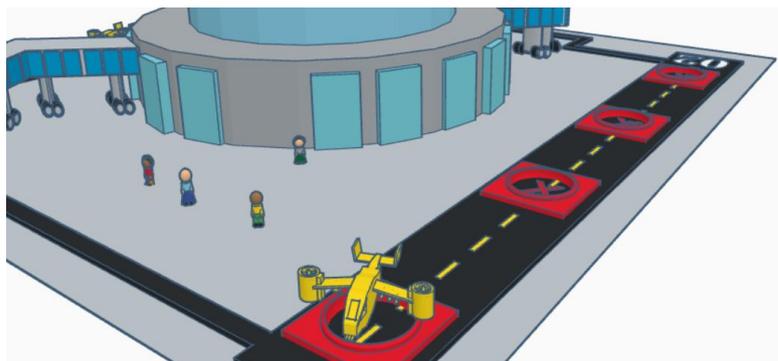


Figura 3.2.- Localización de Vertihubs, elaboración propia

- **Vertiports:** o vertipuerto, estos deberían estar localizados en el centro de las ciudades, donde más demanda diaria hay de recepción y envío de pasajeros y mercancías. Su diseño e inclusión en el espacio es mucho más complejo que los

anteriores, debido a que nos encontraríamos en uno de los espacios que cuenta con más limitaciones de espacio. El uso de estos vertipuertos se presupone mucho mayor que el de los vertihubs, pero el volumen neto de pasajeros y carga menor. Estos deberían estar dotados de puestos de recarga y de mantenimiento rápido en caso del surgimiento de algún problema. Se cuenta con que estas sean las pistas de despegue y aterrizaje que cuenten con una mayor demanda de clientes, por lo que es imprescindible proveerlos de lugares de espera para los pasajeros, personal y sistemas de seguridad constantes.



Figura 3.3.- Diseño de elaboración propia vertiport

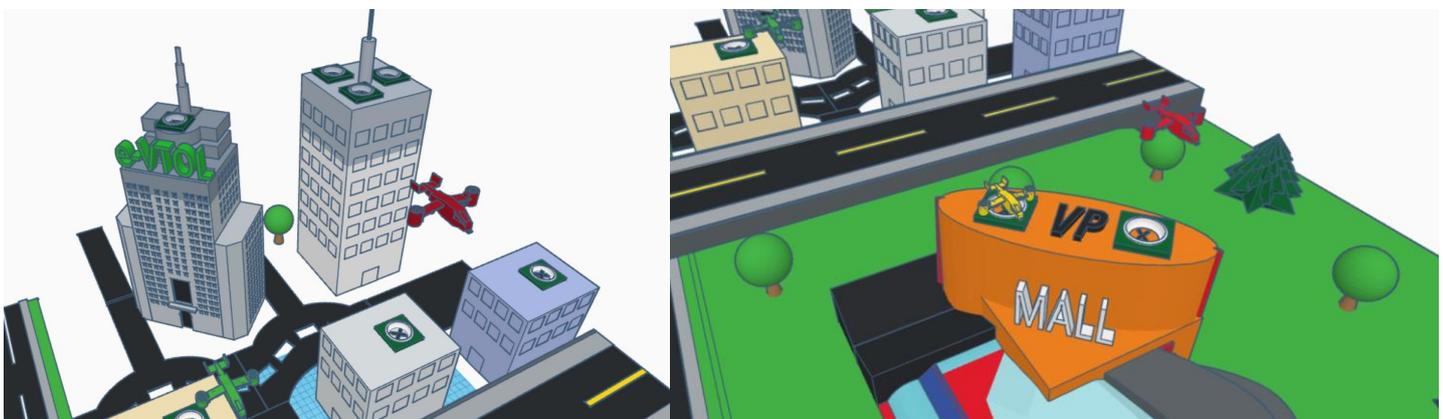


Figura 3.4.- Localización de Vertiports, elaboración propia

- **Vertistation:** por último, comentar el elemento más pequeño de todas las tipologías de plazas de despague y aterrizaje. Estos tan solo contarán con una o dos plataformas preparadas, ya que las aeronaves dejarán y recogerán a pasajeros sin la necesidad de estacionar. Esto dicho, se pueden presuponer la cantidad de ventajas que llevan consigo, ya que el espacio necesario será mucho menor que en los otros dos casos, y no será necesario dotarlos de puntos de recarga o estacionamiento. Es considerado que estas son las estructuras más sencillas de integrar en las ciudades que conocemos hoy en día, ya que se reutilizarían los actuales helipuertos.



Figura 3.5.- Diseño de elaboración propia de Vertistation

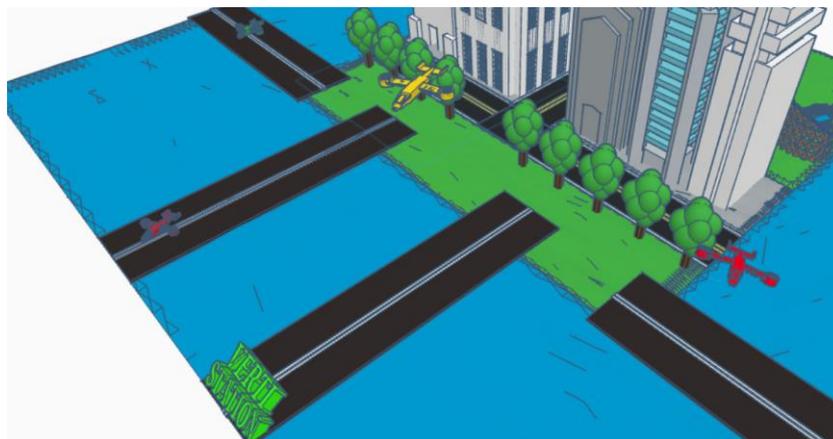


Figura 3.6.- Ejemplo de localización de Vertistation, elaboración propia

Como es comprensible, y como estudiaremos más adelante en el estudio económico, las inversiones necesarias para llevar estos proyectos a la realidad son millonarias. Pero es necesario pararse a pensar que estamos hablando de una importante oportunidad de mercado que puede llegar a superar la barrera que imponen los costes.

Existe otro termino necesario a la hora de poder comprender la envergadura que van a llegar a tener estas estructuras, y este es **FATO** (*área de aproximación final y de despegue*), área definida sobre la que el piloto completa la fase final de la aproximación a un vuelo estacionario o un aterrizaje, y desde la que el piloto o la aeronave inicia el despegue, es decir, define el área en la que finaliza la fase final de aproximación hasta el vuelo estacionario o el aterrizaje, y a partir del cual comienza la maniobra de despegue. Habiendo entendido que es lo que nos quiere decir este término, podemos concluir diciendo que un vertihub necesitará de múltiples FATO, un vertipuerto de varias de ellas y un vertistation de una única.

Tabla 3.1.- Diferencias de necesidades de las zonas de despegue y aterrizaje

	<b>VERTIHUB</b>	<b>VERTIPUERTO</b>	<b>VERTISTATION</b>
<b>FATO</b>	Múltiples	Varias	Una
<b>Puesto de recarga</b>	Sí	Sí	No
<b>Salas de espera para clientes</b>	Sí	Sí	No
<b>Puestos de estacionamiento</b>	Sí	Sí	No
<b>Zonas de mantenimiento</b>	Mantenimiento complejo	Mantenimiento simple	No
<b>Aparcamientos</b>	Sí	No	No
<b>Oficinas</b>	Sí	No	No

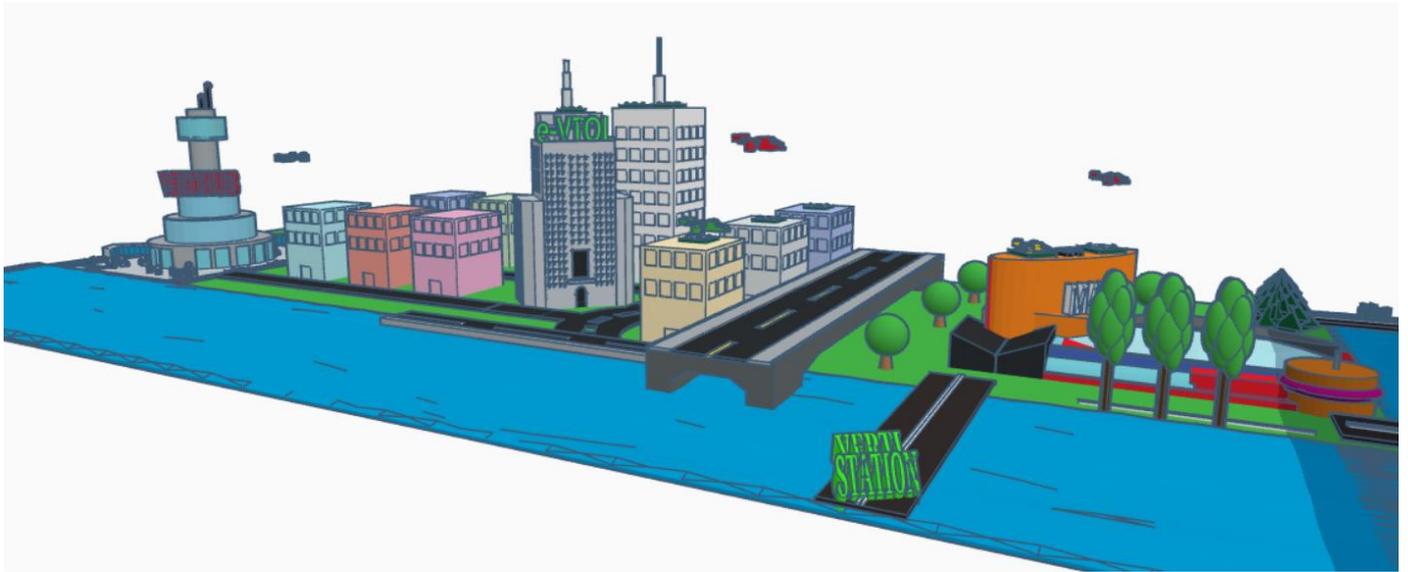


Figura 3.7.- Esquema completo de tipos de vertipuertos, elaboración propia

### 3.1.2. Zona de circulación y estacionamiento

La zona de circulación o zona de rodaje es considerada la zona por la que la aeronave se puede desplazar rodando entre el lugar donde despegar y aterriza y la zona de aparcamiento. Dicho esto, se entiende que la mayoría de los modelos de eVTOL en desarrollo cuentan con un tren retráctil para poder tener la capacidad de realizar la maniobra de rodaje en tierra.

En un punto posterior, estructura, serán comentadas las medidas y la disposición de estas pistas y de las zonas de aparcamiento.

Es necesario diferenciar dos zonas, **rodaje terrestre** y **rodaje aéreo**, siendo el terrestre cuando la aeronave se desplaza sobre ruedas en el suelo, y el rodaje aéreo cuando la nave vuela a baja altitud y velocidad.

Por último, la zona de estacionamiento o **rampa** es una zona dedicada tanto al aparcamiento de la nave como a la carga y descarga de la misma. Es imprescindible que estos lugares garanticen la seguridad de los pasajeros en la maniobra de embarque y desembarque, también porque, además, será el lugar en el que la aeronave es preparada para el próximo vuelo con el mantenimiento necesario.

En la actualidad, existen normativas que contemplan los anchos mínimos y máximos de pistas y rutas de rodaje terrestre y aéreo y de estacionamiento, como la normativa de la

OACI, Organización de Aviación Civil Internacional, agencia que estudia los problemas de la aviación civil internacional y promueve los reglamentos y normas, la ICAO13, las cuales serán comentadas y representadas visualmente más adelante.

### 3.1.2.1. Dimensionamiento de zonas de un vertipuerto

Es necesario considerar muchas zonas de un vertipuerto que requieren unas dimensiones preestablecidas, y para presuponer el ejemplo vamos a utilizar las medidas del eVTOL de *VoloCity* [29]:

Tabla 3.2.- Dimensiones eVTOL Volocity [30]

<b>DIMENSIONES eVTOL VOLOCITY</b>			
Diámetro exterior (rotores incluidos)	Diámetro sin rotores incluidos	Anchura del tren de aterrizaje	MTOM (maximum take-off mass)
11.3 m	9.3 m	2.3 m	900 kg

#### - Rodaje terrestre y aéreo:

Por motivos de garantía, es imprescindible que las pistas de rodaje se encuentren en el medio de una **ruta de rodaje**, la cual es más ancha y se denomina zona de seguridad. En la tabla expuesta a continuación encontramos las dimensiones mínimas de las pistas y rutas de rodaje, las cuales vienen especificadas en el Manual de Helipuertos de la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO). La distancia es especificada en UCW (*Undercarriage width*), término referido al ancho del tren de aterrizaje de la aeronave, y será, por lo menos, el doble de la anchura máxima de este.

Tabla 3.3.- Dimensiones mínimas de rodaje aéreo y terrestre

Rodaje		Anchura mínima de helipuerto terrestres	Anchura mínima de un helipuerto elevado
Terrestre	Pista rodada	1,5 UCW	2 UCW
	Ruta	1,5 D	2 D
Aéreo	Pista rodada	2 UCW	3 UCW
	Ruta	2 D	2 2

Si suponemos que la aeronave diseñada en este proyecto tiene una anchura de tren de aterrizaje de 2.3m, la anchura de la calle de rodaje deberá ser de, al menos, 4.6m.

- **FATO: área de aproximación final y de despegue**

En la normativa comentada anteriormente no se incluye ningún pasaje que establezca restricciones de forma o dimensión de la FATO, pero si decreta que esta debe poder soportar la maniobra de aproximación y despegue de la aeronave. Por tanto, concluimos en que esta zona debe ser un área circular o cuadrilátera en la que se realiza la fase inicial de aterrizaje de la nave y el comienzo de la fase de despegue de esta, por lo que debe ser libre de obstáculos. Repito que la normativa en la que está siendo apoyado este punto del trabajo está pensada para los helicópteros actuales, por lo que se presupone que la nueva normativa para las aeronaves eVTOL será menos restrictiva con unas exigencias menores. En el *Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional* se exponen las características físicas que deben tener los helipuertos en superficie y elevados [31]. Para aplicar esta normativa al nuestro caso concreto se va a profundizar únicamente en las características de las **aeronaves con performance de Clase 1**, donde el tamaño y el área de la FATO debe ser suficiente para acomodar un área capaz de dibujar un círculo con diámetro igual o mayor a 1D, donde D es el tamaño crítico de la aeronave diseñada. En el caso de la aeronave tomada como ejemplo, el diámetro de la FATO debe ser, como mínimo de 11.3 m.

Asimismo, la pendiente de la FATO debería ser suficiente para evitar la acumulación de agua, pero nunca superior al 3%. Para una más extensa explicación recurrir al Anexo I.

En este mismo punto incluimos el **área de toma de contacto y elevación inicial (TLOF)**, área de aterrizaje y despegue, la cual está emplazada dentro de la propia FATO y debe tener

la extensión suficiente para que comprenda en su interior un círculo con diámetro de al menos  $0.83D$  de la aeronave de cálculo. En este caso, quedaría una TLOF de 9.38 m. Para una más extensa explicación recurrir al Anexo II.

- **Área de seguridad operacional, SA:**

Para la correcta comprensión de la figura mostrada a continuación, es necesario comentar el área de seguridad operacional, según el mismo Anexo comentado en el punto anterior, se establece que la FATO debe estar circundada por un área de seguridad operacional que no tiene por qué ser sólida. Además, esta debe tener una distancia a la FATO de 3m o  $0.25D$ , lo que resulte más grande. El diámetro exterior de esta área de seguridad debe ser de al menos  $2D$  si la FATO es circular, como en nuestro caso. Deberá existir una pendiente elevada a  $45^\circ$  desde su borde a una distancia de 10m sin obstáculos. Para una más extensa explicación recurrir al Anexo III.

En el caso expuesto, el área de seguridad tendrá un diámetro exterior de 22.6 m.

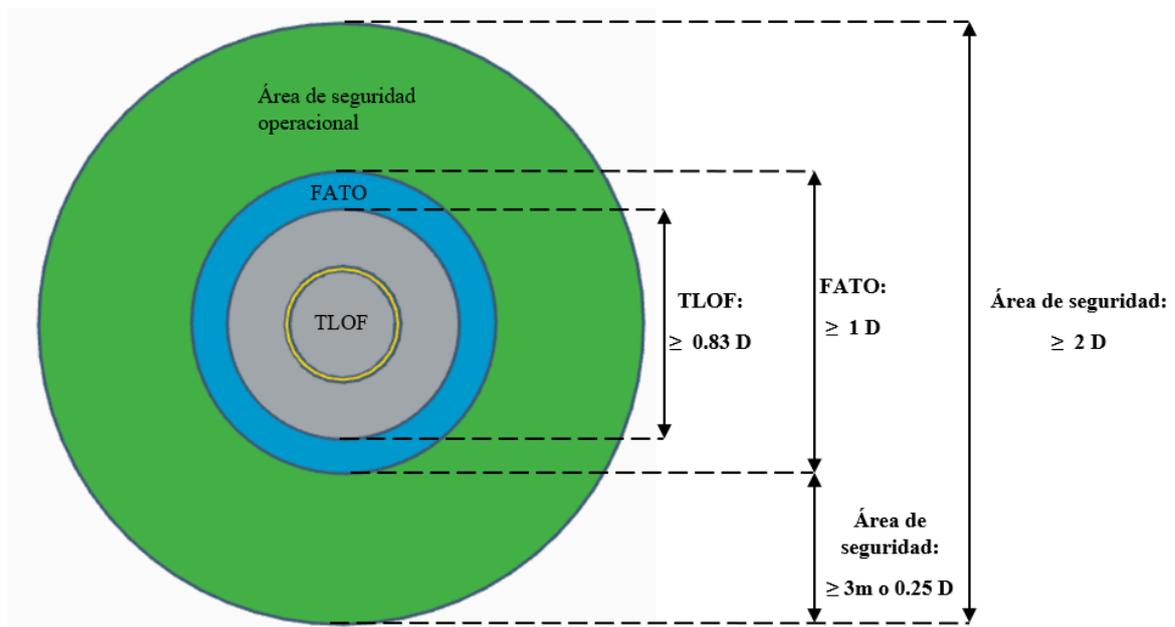


Figura 3.8.- Descripción gráfica de SA, FATO y TLOF, elaboración propia

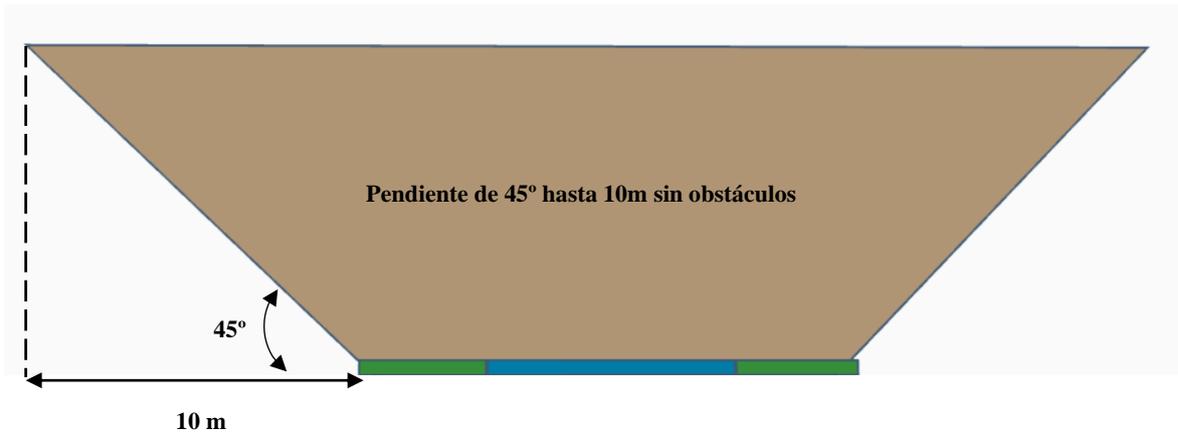


Figura 3.9.- Representación gráfica de la pendiente sin obstáculos, elaboración propia

- **Área de estacionamiento:**

Para el dimensionamiento de este punto nos continuamos basando en el Capítulo 3 del Volumen II del Anexo 14 de OACI, en el cual no se establecen muchas restricciones a la hora de la configuración de estos puestos. Si que se especifica la recomendación de que no estén emplazados directamente debajo de la trayectoria de vuelo y que deben garantizar el seguro embarque y desembarque de pasajeros. Para una más extensa explicación recurrir al Anexo IV.

Esto tenido en cuenta, las dimensiones comentadas en este documento son:

- Anchura del puesto de estacionamiento debe tener, al menos, un diámetro de 1.2D. En el caso expuesto como ejemplo será, como mínimo, de 13.56 m.
- La pendiente de estos no puede superar el 2%.

### 3.1.3. Zona de pasajeros

El aspecto principal de este proyecto es el correcto diseño y puesta en práctica de un sistema de transporte en ciudad para pasajeros, por ello, es necesario que cumpla con unos requisitos mínimos de seguridad y funcionalidad para los mismos. Si no los cumpliese, sería un fracaso [32].

El presente proyecto no va a estar centrado en un correcto diseño de esta terminal de pasajeros, ya que estaríamos hablando de un trabajo muy extenso y completamente diferente.

A la hora del dimensionamiento de este, es imprescindible conocer los espacios disponibles y la cantidad de salas o estancias necesarias.

Es necesario comprender, que una terminal de pasajeros para una estación eVTOL no tiene, ni mucho menos, las características que tiene una aeroportuaria. En nuestro caso, se debe tener muy en cuenta el espacio disponible, ya que la finalidad de su existencia es el ahorro de la mayor cantidad de espacio.

El parámetro más para tener en cuenta es el **PHP** (Pasajeros en Hora Punta), el cual nos da la información de, en un estudio anual, a qué hora es procesado el mayor número de usuarios en la terminal. Como es entendible, a la hora de la realización del diseño, no se utiliza este valor, ya que estaríamos sobredimensionando la capacidad necesaria. Existen muchos estándares para tener en cuenta en el dimensionamiento, como el **Busy Day**, pero se va a profundizar en ellos.

Una vez correcta y profundamente estudiado la capacidad que debe de tener nuestra terminal de pasajeros, se comienza con su dimensionamiento.

Para dar un ejemplo visual de la superficie necesaria, debemos primero decidir de qué tipo de estación estamos hablando, *Vertihub*, *Vertiport* o *Vertistation*, por ello, vamos a considerar un ejemplo de cada una de ellas:

- *Vertihub*: presuponemos que, al ser la mayor estructura de las estudiadas, pueden llevarse a cabo alrededor de 150 viajes por hora, ya que contamos con múltiples estacionamientos de eVTOLs. Por ello:

$$S = 150 \frac{\text{viajes}}{\text{hora}} * 4 \frac{\text{personas}}{\text{viaje}} * 2 \frac{m^2}{\text{persona}} = 1200m^2 \quad (3.1)$$

- *Vertiport*: siendo la estructura más pequeña, y el número de estacionamientos de eVTOLs de 1 o 2, consideramos un número de viajes no mayor a 10 por hora.

$$S = 10 \frac{\text{viajes}}{\text{hora}} * 4 \frac{\text{personas}}{\text{viaje}} * 2 \frac{m^2}{\text{persona}} = 80m^2 \quad (3.2)$$

- *Vertistation*: en este último caso, disponemos de alrededor de 5 estacionamientos del medio de transporte, por lo que podemos suponer la existencia de unas 75 viajes por hora.

$$S = 75 \frac{\text{viajes}}{\text{hora}} * 4 \frac{\text{personas}}{\text{viaje}} * 2 \frac{m^2}{\text{persona}} = 592m^2 \quad (3.3)$$

Estos resultados aproximados no deben ser considerados como válidos, ya que se apoyan en ningún tipo de confirmación técnica, debe ser realizado un estudio basado única y exclusivamente en las necesidades del medio.

### 3.2. Evitación de obstáculos

Es necesario que un proyecto de este calibre sea capaz de asegurar que la realización de todo tipo de operaciones en los vertipuertos sea completamente segura, y para ello, en el mismo Capítulo 4 del Volumen II del Anexo 14 de OACI se recogen las pautas a cumplir para evitar cualquier problema que pueda surgir, entre ellos las **superficies limitadoras de obstáculos**. Para comprender qué va a ser estudiado en este punto, en zonas edificadas urbanas, se definen unas superficies ya comentadas que los objetos de las cercanías del vertipuerto no pueden sobrepasar.

Como ya ha sido comentado, la regulación existente no está aún realizada para el tipo de aeronaves del presente estudio, por lo que serán estudiadas las normas actuales dadas por la OACI y se intentará ajustarlas al objeto de estudio, los eVTOL.

Una vez comentado todo lo anterior pasamos a introducir las superficies necesarias que deben tener un vertipuerto, una subida de despegue y una superficie de acercamiento, al menos, una de cada, además de una superficie de transición.

#### - **Superficie de ascenso en el despegue:**

La principal función de esta superficie es la correcta consecución de la maniobra de despegue sin limitaciones de obstáculos.

Como se puede visualizar en la imagen inferior, el primer tramo tanto de operaciones diurnas como nocturnas tiene cierta divergencia, 10% o 15% respectivamente, continuado por un segundo tramo sin divergencia. Este segundo tramo comienza una vez alcanzada la dimensión de 7D a 10D, respectivamente. Una vez alcanzado este valor, se mantienen paralelos hasta la consecución de una altura de 152 m por encima de la FATO. Ambos de estos tramos corresponden al borde exterior del área de seguridad más el de la FATO de forma perpendicular al eje de la superficie. Para una más extensa explicación recurrir al Anexo V.

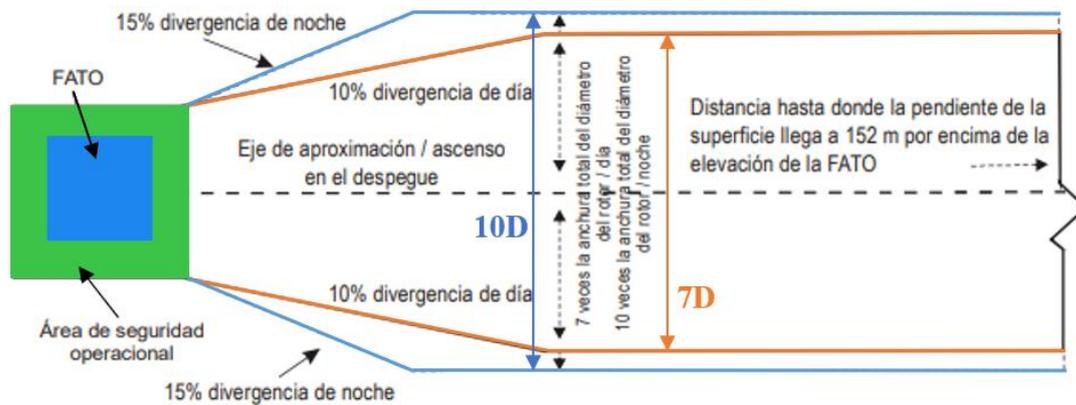


Figura 3.10.- Anchura de superficie de ascenso en el despegue/aproximación con modificaciones propias [31]

Siendo la pendiente para performance Clase 1 (donde están incluidos los eVTOL) de 4.5%:

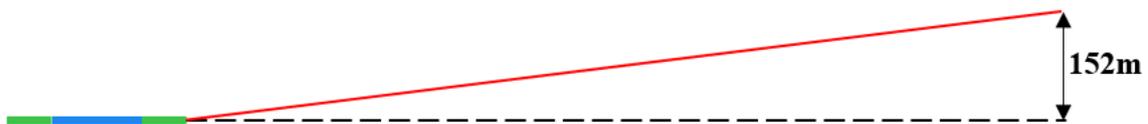


Figura 3.11.- Dimensiones en vista lateral de una superficie de despegue/aproximación, elaboración propia

- **Superficie de transición:**

Esta área funciona de transición entre las superficies de subida en el despegue y el acercamiento. Se extiende a lo largo del borde del área de seguridad y parte del borde de la superficie de ascenso. Alcanza hasta un ancho de 45m y una inclinación ascendente del 50%.

Es una normativa existente para el caso en el que un aeródromo tenga una FATO con aproximación PinS (*point-in-space approach*), alineación con un punto de referencia situado para permitir la posterior maniobra de vuelo o la aproximación y el aterrizaje mediante maniobra visual en condiciones visuales adecuadas para ver y evitar los obstáculos, que incorpore una superficie de tramos visual (VSS), como es en el caso de los eVTOL, debido

a que estos cuentan con sistemas GPS y guiado que servirán de ayuda hasta hacer contacto visual con el área en el que aterrizan. Para una más extensa explicación recurrir al Anexo VI.

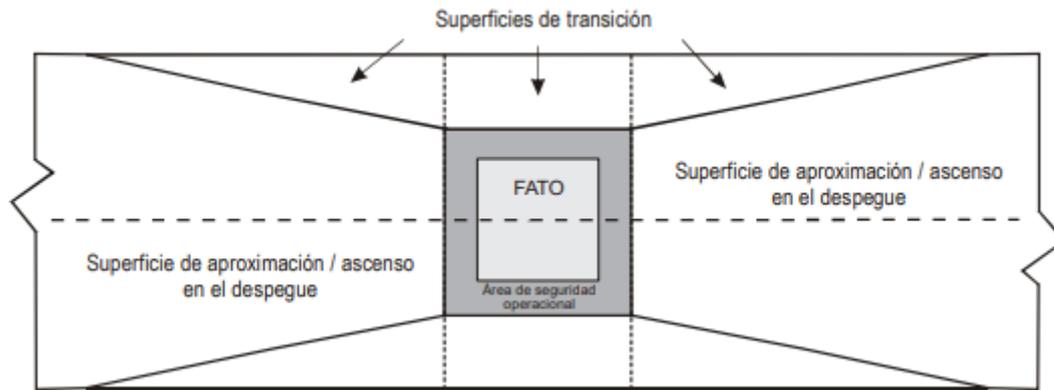


Figura 3.12.- Superficie de transición para FATO con procedimiento de aproximación PinS con un VSS

### 3.3. Sistema de control

Comenzando con la parte técnica que implica un trabajo basado en el vuelo eficiente de una aeronave de despegue y aterrizaje vertical, van a ser comentados los aspectos principales de un sistema de control **autónomo**, sus requerimientos y sus partes principales.

Para poder estudiar profundamente dicho sistema autónomo requerido por este tipo de aeronaves, vamos a centrar el estudio en la primera aeronave existente a nivel mundial que ofrece el vuelo vertical eVTOL como una experiencia.

Se trata de la compañía **Lift Aircraft**, concretamente el sistema o aeronave propuesto por ella, **Hexa** [30]. En un sistema basado en, como veremos más en profundidad, la completa seguridad, autonomía y fiabilidad del medio de transporte, es por ello, que este, permite operar sin requerimiento de licencia.

Ha sido comentado anteriormente el sistema *fly-by-wire*, y es precisamente en este en lo que se basa la tecnología de la compañía Lift Aircraft. A continuación se expone sus características y requerimientos

.

### 3.3.1. Control autónomo: Tecnología fly-by-wire

Comenzar comentando qué es exactamente este sistema fly-by-wire (vuelo por cable), es un sistema basado en el reemplazo de controles de vuelo manuales, hidráulicos o mecánicos por una interfaz electrónica capaz de manipular y controlar dichos mandos a través de una serie de procesadores [33].

Es un sistema que comenzó a desarrollarse en los años 30 en la Unión Soviética, pero que ha seguido siendo investigado por compañías como la NASA, siendo utilizado en el LLRV (Apollo Lunar Landing Research Vehicle) o en el Concorde.

Esta tecnología está continuamente siendo mejorada, y, en el caso de los eVTOL, es utilizada junto con el Autopiloto Veronte 4x, que, como será profundizado, permite controlar de forma segura la aeronave.

Hexa, comentada anteriormente, utiliza como núcleo **GNC** (guía, navegación y control) el **Autopiloto Veronte 4x**, el cual, es un sistema redundante de alto rendimiento de aviónica en miniatura utilizado para el control avanzado de vehículos autónomos, fue desarrollado y producido por **Embention**, empresa española líder en fabricación de componentes para drones profesionales y eVTOL [34].

Veronte 4x, es un sistema de control de alta fiabilidad fácilmente personalizable por el usuario final para el control de drones, UAV, USV, eVTOL o UGV, ofreciendo, además, la fiabilidad requerida por sistemas profesionales.

Este piloto automático es esencial, ya que es el único de acuerdo con los estándares de aviación DO178C/ED-12, DO254 y DO160 (Anexo VII), proporcionando las características necesarias para la certificación UAV. Incorpora sensores y procesadores de última generación, además de la radio datalink LOS y BLOS M2M (término relacionado para descripción de capacidades de comunicaciones). Ha sido diseñado para controlar hasta **32 actuadores**, incluidos servos, frenos u otras superficies de control independientemente si el eVTOL funciona con motores eléctricos o motores de combustión.

Es una solución probada en cientos de vehículos tripulados y no tripulados como núcleo del sistema autónomo, asegura que el vuelo sea seguro, aun pudiendo existir casos extremos donde pueda surgir algún fallo en los componentes. La detección temprana de fallos es posible debido a la estructura de una única red redundante que contiene tres núcleos de piloto automático funcionando simultáneamente. Existe la posibilidad de la agregación de un

cuarto núcleo al módulo en caso necesario. Por ello, en caso de fallo de uno de los núcleos, la **lógica de votación** descarta este núcleo fallido y los sustituye por otro. Esta red es capaz de administrar 18 rotores independientes con multitud de sensores, activándose una seguridad automática contra posibles fallos.

Otra de sus principales características, es la existencia de un sistema dual, lo que permite el monitoreo del estado de todas las naves en tiempo real, desde el propio medio de transporte o desde la estación de tierra. Esto garantiza una doble seguridad, ya que el personal del centro puede ordenar acciones automáticas, como aumento de altitud, vuelta a la estación o la anulación del control manual a bordo.

Como ha sido comentado, es un sistema completamente personalizable, tanto que las múltiples envolventes de vuelo pueden adaptarse a condiciones ambientales, habilidades del piloto o multitud de variables. El software configurable de Veronte Autopilot 4x, incluye una interfaz gráfica que nos permite, también, la personalización del rendimiento del piloto automático, pudiendo definir fases de control y transición, garantizando una transición suave.

Resumiendo y esquematizando, podemos decir que las principales características del Veronte Autopiloto son [35]:

- Control autónomo: es su principal característica. Los algoritmos GNC permiten la personalización de lógicas de control a través de diagramas de bloque combinados con los bucles de control. Existe una tecnología a bordo denominada *fly-by-camera* que consiste en la posibilidad de la toma de control del vehículo por el operador.
- Rendimiento avanzado: contiene y permite la utilización de gran variedad de funcionalidades avanzadas, como el control adaptativo, IMU redundante o 4G integrado, algoritmos de evasión de obstáculos y monitorización de flotas en la nube, entre muchas otras.
- Sentir y evitar: se denomina así a la existencia de algoritmos de evasión de obstáculos fijos y en movimiento a través de la creación de un campo de fuerza de repetición virtual que lo rodea. Para ello, se pueden utilizar radar, tecnología LIDAR (*Light Detection And Ranging*), sistemas de medición masiva de posiciones de forma remota basado en un sensor láser, o dispositivos de detección automáticos o manuales. La tecnología que hace posible la monitorización de flotas es el módulo **M2M**, que nos permite la comunicación 4G y la conexión constante a la nube

Veronte, que es precisamente la forma de poder controlar la flota y otro tipo de condiciones, como las climáticas.

- Seguridad y certificación: como comentado anteriormente, es un software desarrollado de acuerdo con los estándares expuestos, lo que nos asegura su fiabilidad por la obligatoriedad de someter a las naves a **ESS** (*Environmental Stress Screening*) pruebas de vibración, temperatura y condiciones ambientales en el proceso de fabricación. En caso de un fallo considerablemente grave en el piloto automático, cuenta con el microprocesador **FTS**, que activa un sistema de terminación de vuelo.
- Mínimo tamaño: es una de sus principales ventajas, es tanta la reducción realizada que nos permite su instalación en cualquier tipo de vehículo. Aunque pueda llegar a parecer mentira, incluye todo tipo de sensores, de control autónomo, barómetro, Pitot, GNSS, y multitud de otros.
- Arquitectura del sistema: por último, a continuación se puede observar visualmente la integración de este sistema



Figura 3.13.- Arquitectura del sistema Veronte 4x [35]

Para finalizar con el punto del control autónomo del eVTOL, la empresa española Embention se ha asociado con la empresa alemana **Volz**, fabricante de servos. Esta última ha incorporado el sistema **CAN Bus** (Controller Area Network), compatible con el autopiloto de Embention Veronte 4x. Las ventajas que nos proporciona el sistema CAN Bus es el

completo uso de las capacidades de diagnóstico del actual por el usuario, además de ampliar la cantidad de datos que se pueden intercambiar entre el autopiloto y las unidades servo [36].

### 3.4. Sistema de carga

Considerando el mundo en el que vivimos actualmente, en el que cada día es más necesaria la evolución hacia un sector lo más sostenible posible, una de las grandes ventajas que presentan estos medios de transporte es su propulsión eléctrica.

Y es en este momento donde nos encontramos con el principal problema de la integración de los eVTOL, la carga ineficiente. Por ello, en este punto vamos a dividir la materia de estudio en dos partes, las baterías y el cargador de baterías.

#### 3.4.1. Baterías

En la actualidad, nos encontramos con multitud de proyectos en desarrollo sobre pilas de combustible y baterías eficientes, siendo la integración de estas el principal problema al que se enfrentan los desarrolladores. Pero, si queremos implementar un sistema de transporte eficiente y seguro, es necesario una correcta elección y diseño de estos sistemas de propulsión eléctrica.

Para poder realizar un estudio correcto para la elección de este sistema, es necesario tener en cuenta el peso de la aeronave, ya que los sistemas de almacenamiento energético están expresados en energía específica (Wh/kg – kWh/kg), la cual depende del peso.

Uno de los principales errores de pensamiento del usuario promedio, es pensar que la energía necesariamente debe ser suministrada por baterías, y esto no tiene por qué ser así [37]. A continuación, se exponen los diferentes sistemas de alimentación para aeronaves VTOL:

- Almacenamiento electroquímico de energía, sistema de baterías: este requiere una gran capacidad de almacenamiento en las baterías instaladas. Es el sistema más empleado, y por ello se encuentra en desarrollo constante, y el principal problema que surge es la baja capacidad de energía específica, lo que se traduce en la necesidad de gran cantidad de almacenamiento, es decir, un considerable aumento del peso. La propia autonomía de la aeronave está limitada por el peso de los medios de almacenamiento. Puesto que se trata de un sistema en desarrollo, se presupone que,

en un futuro cercano, estos sistemas de almacenamiento tengan una mayor densidad energética. En la actualidad, las baterías de litio (que son las más utilizadas), tienen una energía específica de entre 100-265 W\*h/kg (0.1-0.265 kW\*h/kg). En el gráfico de a continuación, podemos observar el desarrollo esperado de cada tipo de batería:

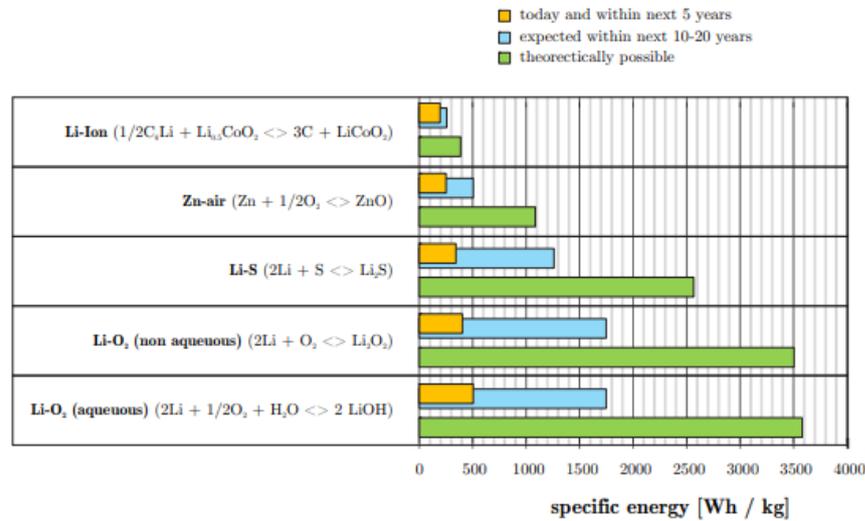


Figura 3.14.- Tecnología actual de las baterías y evolución prevista [38]

- Conversión electroquímica de la energía, pilas de combustible: estas pueden funcionar con diferentes fuentes de energía, destacando el **metanol**, **gas natural** o el **hidrógeno**. Su principio de funcionamiento es la reacción galvánica entre el ánodo y el cátodo, utilizándose para la propulsión o la carga. Esta tecnología aún no ha salido a mercado, pero se espera que puedan suponer una gran ventaja de densidad energética. Tiene multitud de puntos positivos, entre ellos la capacidad de pérdida de peso durante el vuelo, ya que el combustible se va consumiendo, como en un proceso de combustión convencional. Si por ejemplo comparamos la energía específica de una batería de litio contra unas pilas de combustible de hidrogeno, de 33.33 kW\*h/kg, observamos que es un valor muy superior a los sistemas de almacenamiento actuales.
- Combustión convencional: en donde se genera energía a través de un motor de turbina o de pistón que quema un combustible, queroseno. La turbina alimenta un generador que produce energía eléctrica utilizada para alimentar a los motores eléctricos. Como es entendible, no es la solución que estamos buscando, ya que

lo que queremos conseguir es un sistema de transporte lo menos contaminante posible. Como ventaja cabe destacar que, técnicamente, su alcance es muy superior al de un sistema de propulsión eléctrico.

- Sistema híbrido: en este tipo de solución, podemos combinar las ventajas de ambos conceptos. Consistiría en utilizar una batería que actúe como dispositivo de almacenamiento temporal, ahorrando peso, y utilizar un sistema de pilas de hidrogeno o de turbina con generador para la consecución de la energía necesaria. Cabe mencionar que para la implementación de un sistema híbrido en una aeronave eVTOL, es necesario realizar un extenso estudio, ya que hoy en día no conocemos cuál sería la eficiencia global del sistema.

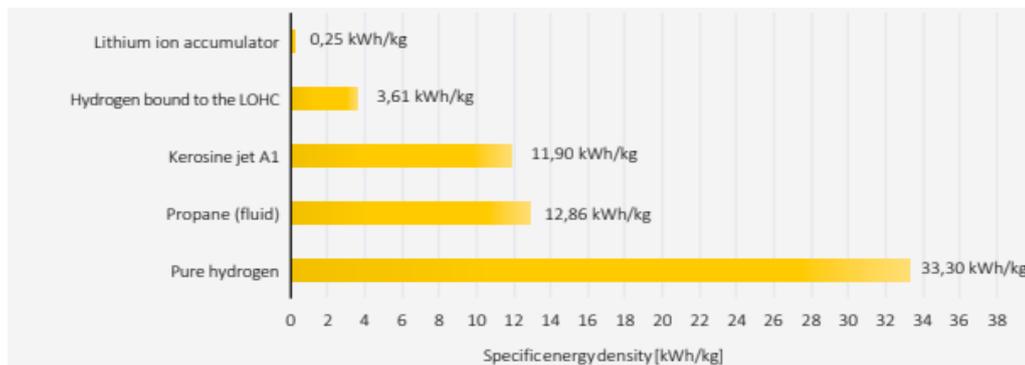


Figura 3.15.- Comparativa de los diferentes sistemas de almacenamiento energético

La búsqueda de la tecnología más eficiente en el mundo en el que vivimos es complicada, y, aunque si es cierto que se considera que en los próximos años las baterías de litio van a sufrir una mejora importante, no van a llegar a conseguir igual a la capacidad de otros sistemas, considerando además el peso adicional que debería tener que soportar la aeronave.

#### 3.4.1.1. Baterías de litio

El principal problema que está presente en el uso de las baterías de iones de litio en el ámbito de la aviación es el balance de la cantidad de energía necesaria para conseguir que la aeronave vuele durante un tiempo suficiente con la cantidad de peso que transporta. Por ello,

su adaptación es muy complicada, ya que su densidad energética las hace mucho menos viables en comparación con sistemas de combustión tradicionales.

Como hemos visto anteriormente, la solución no debe ser el añadido adicional de un mayor número de baterías en el eVTOL, así que el planteamiento que surge es la consecución de una forma de recarga rápida de las mismas.

Existe una batería en proceso experimental creada en la Universidad de Pensilvania, que consiste en el uso de carga a altas temperaturas para lograr la suficiente energía para realizar vuelos de 80 km en solo 10 min de recarga.

La pregunta que surge es como puede llevarse a cabo este calentamiento a altas temperaturas sin generar la aparición de dendritas en las baterías de litio. Y esto es a través del añadido de una lámina de níquel en el terminal negativo, haciéndose posible el calentamiento de la batería hasta los 60°C en solo 30 segundos, la batería se mantiene a dicha temperatura durante 10 minutos, tiempo suficiente para llevar a cabo su carga completa. Una vez recargada, se enfría rápidamente. Otro problema que puede surgir es la vida útil de estas baterías, pero los científicos desarrolladores de esta técnica aseguran un correcto rendimiento de estas durante más de 200 ciclos de carga.

Como conclusión de este sistema, cabe destacar que a través de él conseguimos todas las características que necesitamos en una batería de eVTOL, densidad de energía muy alta, bajos tiempos de recarga y alargamiento de su vida útil [39].

### 3.4.2. Cargador eficiente

Estos medios de transporte aéreo requieren una estación capaz de ofrecer un sistema de recarga lo más eficiente y rápido posible. El proyecto en desarrollo actualmente, y el que más probabilidades de implantación tiene, es el de la colaboración de la empresa Lilium y ABB [40].

La potencia suministrada por esta estación sería de 1000 kW, cuatro veces más que los cargadores de máxima potencia de Tesla. Con estas características, estaríamos hablando de la carga completa de un eVTOL promedio en 30 minutos, considerándose el alcance de 250 km a una velocidad de crucero de 282 km/h.

El principal inconveniente que surge es la infraestructura necesaria para llevar este proyecto a la realidad, ya que la instalación eléctrica actual no sería capaz de soportar la carga de vehículos masiva.

### 3.4.3. Control óptimo multifásico

La aeronave de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL) puede proporcionar una comodidad excepcional en el ajetreado transporte por carretera actual, pero la baja resistencia de las baterías de litio impone muchas limitaciones a su funcionamiento.

En esta etapa, se discutirá el problema del control óptimo de múltiples etapas con el consumo de energía como indicador de rendimiento para un avión eVTOL multirotor. Con este estudio se busca obtener una vía de acceso óptima para un determinado concepto operacional (CONOP), componente esencial del transporte seguro y eficiente de pasajeros y carga.

Para desarrollarlo, nos enfocamos en el caso de la aeronave eVTOL EHang 184 y la propuesta de Uber para el *vertiport* en cinco conceptos operativos diferentes. Una vez estudiados estos casos, se revisa el consumo eléctrico de cada uno para la consecución del CONOP más eficiente.

Es necesario introducir varios conceptos imprescindibles, entre ellos el **RTA** (Tiempo requerido de llegada), el cual posibilita a las aeronaves al cumplimiento con la hora de llegada controlada (**CTA**) impuesta por el Control de Tráfico Aéreo (**ATC**). Para poder cumplir con esta RTA asignada, se pueden realizar ajustes de velocidad, modificación de trayectoria, o ambas. Un consecuente uso de estos términos nos permitirá un manejo de las operaciones aéreas para la previsibilidad del tráfico y la llegada de información [41].

Para ello, cada aeronave eVTOL debe seguir con precisión una trayectoria 4D, compuesta por:

- Una trayectoria previamente planificada en 3D que debe ser lo más eficiente posible teniendo en cuenta el punto de vista energético de duración de baterías
- Restricción de tiempo a lo largo del tiempo, de manera que se cumpla la suficiente separación entre aeronaves y franjas horarias de llegada al puerto

Es imprescindible que esta trayectoria planificada consuma una energía menor que la disponible en el aeronave en las baterías de litio.

Como se ha comentado, la aeronave de objeto de estudio va a ser la de la empresa EHang, la cual cuenta con cuatro brazos, cada uno con dos rotores coaxiales idénticos que giran en sentido contrario. La trayectoria entre la posición inicial en el aire (crucero) y el vertiport se considera una trayectoria preestablecida y no cambiante, por lo que la trayectoria que se debe optimizar es únicamente la vertical.

Para formular teóricamente el control óptimo entre fases se utiliza **Lagrange**:

$$J = \sum_{N=1}^2 \int_{T_0}^{T_f} L^N(y(t), u(t), t) dt \quad (3.4)$$

Estando sujeto a restricciones dinámicas de primer orden, de trayectoria y a límites de control:

$$\begin{aligned} \frac{dy(t)}{dt} &= f^N(y(t), u(t), t) \\ C_{min}^N &\leq C^N(y(t), u(t), t) \leq C_{max}^N \\ u_{min}^N &\leq u(t) \leq u_{max}^N \end{aligned} \quad (3.5)$$

Siendo L la función de coste lagrangiana,  $N=1$  la fase de vuelo vertical y  $N=2$  para el descenso.  $Y(t)$  el vector de estado,  $u(t)$  el vector de control y  $C(y(t), u(t), t)$  las restricciones de trayectoria.

Es necesario considerar ángulos de balanceo, cabeceo y guiñada a través de mecanismo de empuje diferencial en los rotores. Para simplificar el problema del control óptimo, la dinámica longitudinal de la aeronave se desacopla de la dinámica lateral. Traducido en que el problema de generación de la trayectoria vertical se convierte en un problema de dinámica de vuelo en 2D en únicamente el plano vertical. Para ello se utilizan fórmulas que dependen del vector de posición del centro de masa, el ángulo de inclinación del rotor y de trayectoria del vuelo, el empuje neto, la resistencia neta y la aceleración producida por la gravedad.

Para resumir y acelerar el proceso de cálculo, he de comentar que es necesario el cálculo de los siguientes parámetros:

- Modelo de arrastre: basándonos en la velocidad máxima de la aeronave en tierra y en la teoría del flujo incomprensible
- Teoría del momento en vuelo estacionario: utilizando la velocidad inducida durante el planeo
- Teoría del momento en vuelo de avance: para su cálculo es necesario conocer la velocidad real de avance y el ángulo de ataque entre aire y el disco del rotor
- Interferencia del rotor coaxial en vuelo de avance: para ello consideramos los cuatro pares de rotores girando en dirección contraria utilizando la potencia inducida por el brazo y el factor de interferencia del rotor
- Potencia requerida por aeronave: para su cálculo se necesita conocer la potencia suministrada al rotor, la potencia instantánea requerida por la aeronave, la potencia inducida, la parásita, de ascenso y la de perfil.
- Índice de rendimiento del control óptimo multifásico: donde se estudian la potencia suministrada por el paquete de baterías, la potencia consumida por los motores y el índice de rendimiento de control óptimo multifásico.
- Restricciones de trayectoria: para su cálculo hay que saber que en una aeronave en descenso desde la fase de crucero, el flujo desarrolla recirculación cerca del disco y turbulencia por encima de él, pero a pequeñas velocidades de descenso, el flujo en las proximidades del disco está bien representado por el modelo de la teoría del momento. El problema surge en el estado de anillo de vórtice, ya que el flujo cerca del disco se vuelve muy inestable y turbulento, provocando vibración y pérdida de control, para evitar esto, se imponen restricciones a la fase de descenso. Se introduce en este punto el concepto de **TOD**, que es el *waypoint* de transición de fase.
- Tiempo final fijo: mediante el uso de algoritmos de programación de llegadas, se calcula el RTA para cada tipo de aeronave eVTOL, imponiéndose como restricción de tiempo final. Por lo que podemos decir que:

$$t_f = RTA \quad (3.3)$$

Las ecuaciones de movimiento de la nave multirrotor eVTOL son ecuaciones diferenciales no lineales en el tiempo, por lo que los problemas de optimización de trayectoria son resueltos mediante **GPOTS** e **IPOPT**, los cuales encuentran una solución óptima local. Para poder relacionar esta solución con una global, son estudiados 5 tipos diferentes de CONOPS:

- CONOP1: Absorción del retardo modificando la trayectoria de descenso
- CONOP2: Absorción del retardo controlando la velocidad de descenso
- CONOP3: Absorción del retardo controlando la velocidad de crucero
- CONOP4: Absorción del retardo mediante vuelo estacionario
- CONOP5: Absorción del retardo combinando velocidad de crucero y control de velocidad de descenso

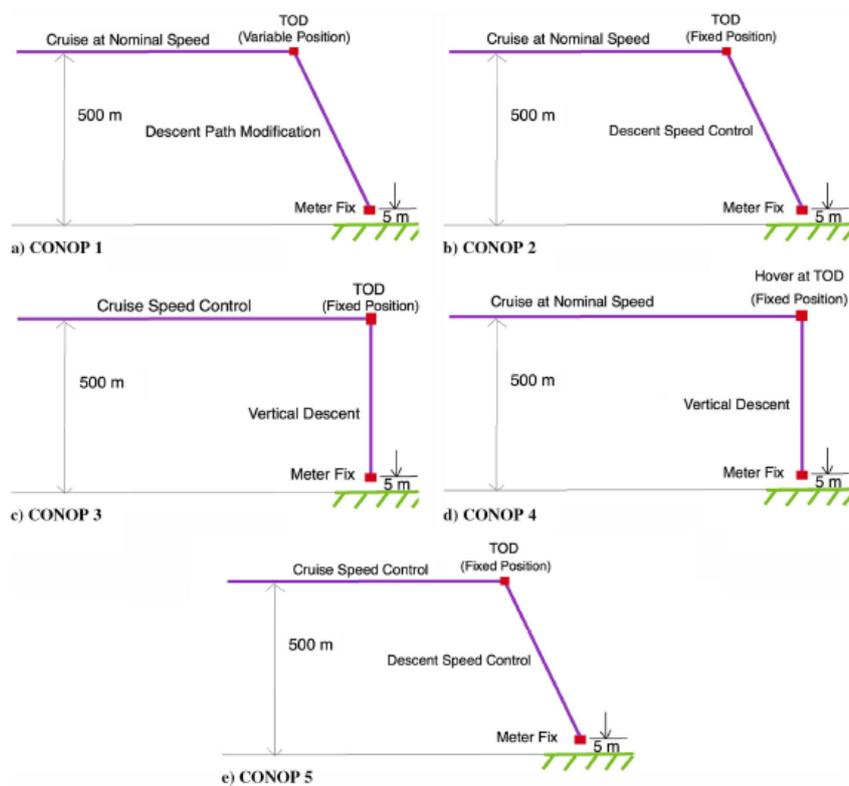


Figura 3.16.- CONOPS bajo estudio de trayectoria

En este punto, aplicando los algoritmos anteriormente comentados, se calcula la eficiencia y el consumo energético de cada uno de los CONOPS comentados obteniendo un resultado final de comparativa energética entre todos ellos:

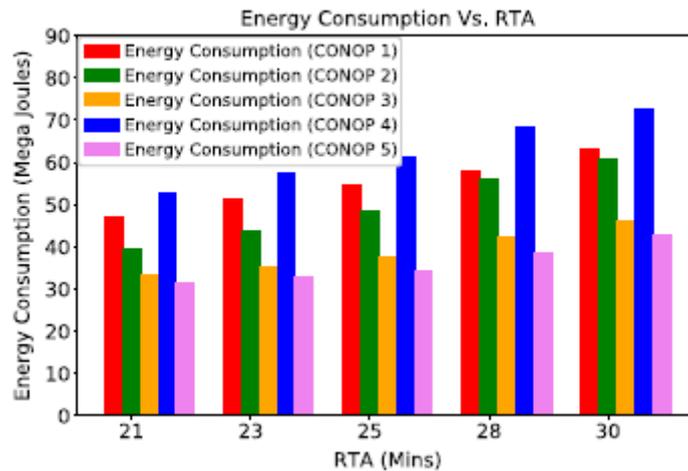


Figura 3.17.- Comparativa del consumo energético de cada CONOP [41]

Para concluir con este punto de búsqueda de trayectoria eficiente, para el cumplimiento de llegada (RTA) asignada por la UAM para un determinado concepto de CONOP.

Como se puede comprobar en el gráfico superior, la CONOP 5 es la operación que mejor llegada energéticamente eficiente consigue, mientras que la CONOP 4 es la menos eficiente de todas.

En el futuro, para manejar mejor los retrasos en los vuelos en un entorno operativo UAM grande, debe considerarse una combinación de:

- Control de la velocidad del aire
- Control de pendiente
- Ajuste de deslizamiento.

### 3.5. Sistema de propulsión

Un sistema de aeronave de aterrizaje y despegue vertical (eVTOL), cuenta con un sistema de propulsión eléctrica distribuida (**DEP**), sistema que combina la aerodinámica con el empuje y las cero emisiones. El cual es un concepto alterable con el potencial de mejorar el rendimiento, eficacia y durabilidad de los vehículos aéreos.

Este sistema utiliza propulsores eléctricos para proporcionar el empuje necesario durante el vuelo y la operación distribuida, asociada a la integración sinérgica de propulsión y fuselaje.

El uso de DEP para habilitar el control del vehículo también proporciona nuevas formas de reemplazar o mejorar la capacidad de control que ofrecen las superficies tradicionales. Con el control basado en el empuje, una cabina de vuelo convencional se puede reducir para minimizar el peso de la aeronave, o se puede usar la naturaleza distribuida del empuje para garantizar el control de campo en caso de fallos críticos y otros sistemas de control del vehículo.

Los vehículos eVTOL con sistemas de propulsión distribuidos o rotativos o de ala fija presentan desafíos de control únicos, ya que cada motor eléctrico en estos sistemas puede ser una fuente de elevación, potencia o elevación.

Los métodos existentes tienden a utilizar técnicas de control diseñadas específicamente para aeronaves de ala fija o multirotor. Se propone un nuevo marco de control aplicable a diferentes tipos de medios eVTOL, siendo el enfoque propuesto:

- Distribuido y descentralizado
- Óptimamente adaptativo
- Capaz de identificar el control en tiempo real que genera empuje distribuido
- Podría combinarse con superficies de control convencionales si fuera necesario.

También presentamos una estrategia para evitar la saturación de la capacidad y velocidad de las entradas de control de empuje distribuidas. La efectividad del marco propuesto se demuestra a través de simulaciones y experimentos de circuito cerrado con compuestos experimentales de eVTOL [42].

### 3.6. Normativa

Ya se ha comentado a lo largo del desarrollo de este trabajo, la existencia de EASA (Agencia Europea de Seguridad Aérea), la cual está desarrollando, a la vez que la UAM continúa cambiando, un marco normativo aplicable a las aeronaves de estudio.

No existe hoy en día, una normativa completamente aplicable a los eVTOL, ya que aún siguen en un completo proceso de desarrollo tecnológico y de eficiencia energética. Pero, llegados a este punto, el principal problema existente es el suelo terrestre. Cada país o región tiene una normativa diferente, y por eso existen agencias desarrollando un punto en común para la implantación de una única normativa para los puertos de estas aeronaves.

Es por ello, que la EASA, está desarrollando un marco regulatorio para la infraestructura de la UAM y para poder continuar con el crecimiento de esta industria naciente. Esta nueva industria de VTOL y vertipuertos no difiere en cantidad con la existente tecnología aérea y los helicópteros y helipuertos, por ello es que la mayor parte de la reglamentación asociada a estos puede ser aplicable a estas nuevas infraestructuras [43].

Se está utilizando como base de creación del nuevo documento el Volumen II del Anexo 14 de OACI, pero sí es cierto que existen conceptos que no se ven reflejados en él, como el incendio de baterías, la recarga de vehículos eléctricos o el aterrizaje y despegue de vehículos autónomos. Existen otras normativas existentes que están siendo utilizadas para esta nueva generación de legislación, como son la AC 150/5300-13B de la **FAA** y el Reglamento de la Unión Europea 139/2014 de la **CE**.

Para un rápido desarrollo de estos nuevos estándares, la EASA ha desarrollado un **VTF** (grupo de trabajo de vertipuertos), para la consecución de un Manual de diseño de Vertiports.

Existen multitud de organismos internacionales que también están desarrollando estándares para la infraestructura terrestre de la UAM, como EUROCAE (WG112 VTOL SG5), para el desarrollo de estándares de infraestructura de carga y operaciones en vertipuertos. Por otro lado, ASTM en el comité F38 está desarrollando una especificación para sistemas de aeronaves no tripuladas.

En nuestro país, existe una normativa de recarga de vehículos eléctricos (ITC BT-52), pero obviamente, no está enfocada a la recarga de aeronaves eVTOL. Es por ello, que con el rápido crecimiento tecnológico, las instituciones deben acelerar en la adaptación para la carga rápida de vehículos que cuentan con una exigencia de potencia mucho mayor.

## 4. APLICACIÓN DE LAS AERONAVES eVTOL

En este punto, van a ser estudiadas las diferentes aplicaciones que tiene un medio de transporte eficiente, como es el eVTOL, con sus ventajas y desventajas, así como la infraestructura necesaria que requiere la integración de estas aeronaves en el mundo actual.

### 4.1. Integración como medio de transporte

Cuando se habla de la aplicación de los eVTOL, siempre resalta y se desarrolla su utilización como transporte urbano, como servicio de taxis. Pero, en la realidad, es una tecnología que podría extenderse en la mayoría de los hábitos en la vida real. Sí es cierto que encontrar y desarrollar una buena integración del uso de este transporte fuera del movimiento de pasajeros no va a ser fácil y va a requerir un gran desarrollo del sector, pero el resultado puede suponer innumerables ventajas.

Es más, según el director del programa *Transformative Vertical Flight Working* de la NASA, Johnny Doo, resume las aplicaciones del uso de este medio de transporte en seis grandes grupos, siendo estos [41]:

- **Transporte médico:** en este grupo pueden considerarse numerosas categorías, como son el transporte de enfermos (ambulancia), transporte de órganos, transporte logístico en pandemia.
- **Operaciones militares:** considero que es una categoría no tan necesaria en un país como España, pero sí imprescindible en otros, y en este punto pueden ser incluidas misiones fronterizas de reabastecimiento, logística militar, operaciones de barco a tierra.
- **Búsqueda y rescate:** este puede que sea el punto más interesante y el más amplio a su vez, ya que podemos incluir en él vigilancia costera, rescate marítimo-terrestre, rescate de montaña, rescate en zonas frías, rescate durante inundaciones o desastres naturales.
- **Emergencia / Respuesta humanitaria:** este punto puede considerarse de diversas maneras, ya que, por un lado, podemos comentar la monitorización y control de cualquier tipo de desastre natural como incendios, volcanes, inundaciones, tsunamis, terremotos... como el rescate de personas en estos mismos casos.

- **Aplicación de la ley:** puede considerarse un punto similar al militar, pero incluyendo, en este caso, la respuesta rápida en caso de emergencia local, control fronterizo, disponibilidad de soporte en emergencia, prevención de cualquier tipo.
- **Servicio de bomberos:** por último se habla de un servicio muy interesante, ya que nos puede servir para el rápido transporte de bomberos o material de extinción de incendios, la extracción y evacuación de civiles en zonas peligrosas debido al fuego, respuesta rápida en caso de incendio en áreas más salvajes, suburbanas o campestres.

Considero que existen miles de aplicaciones más que, en un futuro, el eVTOL puede estar preparado para atenderlas, algunas de ellas son, por ejemplo:

- **Turismo:** siendo este un ámbito mucho más lúdico, en el que podemos incluir excursiones por distintas zonas de una ciudad, para la toma de fotografías, videos.
- **Transporte logístico:** es una aplicación muy considerada hoy en día, el transporte de carga. Este ámbito, con el tiempo, se puede extender al reparto rápido en zonas alejadas.
- **Transporte de pasajeros:** es la aplicación más conocida y, por supuesto, la que se considera con más posibilidades de desarrollo.
- **Aplicación científica:** como ya se ha comentado, un buen uso de esta tecnología es el control y la monitorización de catástrofes naturales, por lo que también se puede utilizar para la toma de muestras de estas mismas, o para la investigación atmosférica, por ejemplo.

Las aplicaciones, como comentado, son infinitas, pero, siendo realistas, su integración en el mundo actual no es sencilla para la mayoría de ellas. Es por eso, que este estudio se va a centrar en el desarrollo de las que más posibilidades de integración cercana tienen [44].

Es por ello, que vamos a considerar cuatro servicios principales en desarrollo:

- **Transporte de mercancía y paquetería 2025-2030:** servicio que se ofrece para permitir la entrega de paquetes desde centros logísticos de distribución hasta centros de distribución locales para la entrega rápida de paquetes. Es un servicio con una amplia evolución, ya que en un principio estaría orientado al reparto urbano, mientras que en un futuro estará ampliado a cualquier área, urbana o rústica.
- **Transporte público eficiente, rutas predeterminadas 2025-2030:** el concepto es similar al actual de metro, autobús o cercanías, con rutas preestablecidas, horarios

regulados y paradas fijas en zonas punta urbanas. De esta manera, el tiempo de llegada en horas punta será muy inferior al actual.

- **Transporte diario en ciudades, servicio de taxi 2030-2035:** servicio orientado a la imitación de un taxi, Uber en la actualidad. Es un medio de transporte que permite a los usuarios que lo utilizan poder pedir el servicio al punto de encuentro más cercano de su ubicación y poder solicitar la llegada a donde se desee. Al contrario que el caso anterior, son viajes no programados, se realizan a demanda.
- **Transporte de enfermos, respuesta de emergencia 2020-2035:** este servicio es uno de los más complicados de aplicar, ya que un transporte autónomo (sin piloto), no es capaz de recoger a un enfermo por sí solo, así que esta más orientado a la rápida llegada de ayuda, como método de apoyo a un servicio médico. Este tipo de transporte eVTOL permite una maniobrabilidad muy superior a la de los helicópteros de rescate en zonas rurales donde el acceso presenta una gran dificultad.

En el gráfico a continuación, podemos observar el tiempo necesario para el surgimiento de un mercado que apoye estas iniciativas, y, por tanto, la integración de estos eVTOL en los campos estudiados.

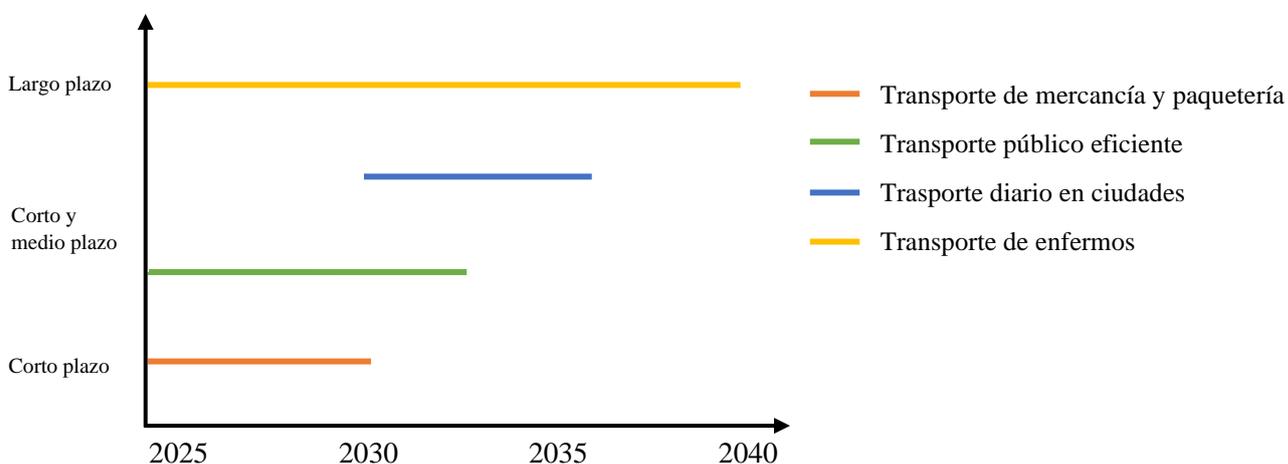


Figura 4.1.- Desarrollo e integración de los diferentes tipos de servicio eVTOL, elaboración propia

Para que la aparición de este mercado necesario para la existencia de los diferentes tipos de servicio que nos ofrecen los eVTOL, es necesario afrontar no solo los retos técnicos implicados, sino también los operativos y de integración de un sistema completamente autónomo e independiente.

En puntos anteriores, se ha comentado la magnitud de la infraestructura que necesita este tipo de aeronaves, y en este momento, nos encontramos con la necesidad de muy diferentes tipos de esta, ya que no se necesitan las mismas bases de recarga y operación en un servicio de taxis como en un servicio de ambulancia aérea. Es por ello, que en el desarrollo de cada uno de los puntos se van a comentar las diferencias en infraestructura y sus ventajas y desventajas, donde se comprenderá mejor la razón de demora en cada uno de los distintos servicios aéreos eficientes.

Otro punto por considerar es la **aceptación ciudadana** a la implementación de estos servicios, para que se dé dicha aceptación, se debe proporcionar:

- Seguridad y seguridad laboral: como en cualquier tipo de tecnología emergente, la desconfianza es normal. Por otro lado, la seguridad laboral está asociada a los empleos, ya que surge la problemática de dejar obsoleto el trabajo humano.
- Privacidad: todos los sistemas de tecnología eVTOL cuentan con sistemas de detección por cámara, por lo que puede surgir algún tipo de desconfianza en cuanto al trato de estas imágenes.
- Cumplimiento de las políticas medioambientales: aun siendo una de las razones principales por las que se desarrolla esta tecnología, el impacto que puede ocasionar produce rechazo a una gran parte de la población.
- Disminución considerable del ruido visual y sonoro: en la actualidad, los helicópteros no son vistos con agrado por el ruido provocado, por lo que es normal que no se quiera introducir otro sistema que lo produzca.

El área de la NASA dedicada a la UAM (Urban Air Mobility), realizó una encuesta a 2500 personas, de las que un 25% afirmaron una aceptación completa a los vehículos aéreos no tripulados, mientras que otro 25% aseguró que no utilizarán ningún tipo de estos servicios una vez disponibles. De estos datos podemos decir que existe una gran parte de la población encuestada que potencialmente usaran estos servicios en su vida cotidiana.

Podemos asegurar que los principales problemas o inseguridades generados entre la población están asociadas a la seguridad de las personas, y es una de las razones por las que

el servicio de paquetería y carga será el primero en ser implementado. A partir de este punto, si se demuestra al público que es una tecnología segura y eficiente en todos los sentidos, es muy probable que el número de personas que utilicen este servicio crezca considerablemente una vez disponible.

Para finalizar con la introducción de este apartado, he de comentar que debe crearse un producto **flexible** y abierto al cambio y a la evolución, ya que la tecnología va a seguir avanzando y, por supuesto, debe ser **independiente**, no debe crearse un monopolio de ningún tipo en proveedores de infraestructura o componentes, ya que se puede generar un problema más que una solución.

#### 4.1.1. Transporte de mercancía o paquetería

En este primer punto de transporte de mercancía, es necesario diferenciar los tipos de servicio que se pueden ofrecer, ya que de ellos dependerá el tipo de aeronave, la velocidad y la autonomía que debería de tener.

Como se puede comprender, y es algo que ya es utilizado hoy en día, es el reparto de carga a través de drones, servicio muy desarrollado por múltiples empresas como veremos a continuación.

Cuando pensamos en el transporte de carga a través de **drones**, es muy posible que lo que se nos venga a la cabeza es una mercancía de pequeño tamaño y peso, pero no tiene por qué ser así. Es en este momento cuando introducimos el *Volodron*, solución presentada por la empresa Volocopter como solución a cargas pesadas. No es el típico dron que podemos encontrarnos en cualquier lugar, sino que cuenta con una envergadura de nueve metros para el transporte eficiente, eléctrico y autónomo de hasta 200 kilogramos. Está basado en el eVTOL presentado por la misma empresa (*VoloCity*), pero pensado para el transporte de mercancía.

Tabla 4.1.- Características principales del Volodron [45]

Características del Volodron	
Diámetro	9,2 m
Rotores	18
Carga máxima admisible	200 kg
Autonomía	40 km
Velocidad máxima	110 km/h

Este dispositivo aún no está en el mercado ni se ha publicado fecha de lanzamiento, pero la empresa promete el posible uso del mismo en diferentes aspectos, no solo el uso logístico, sino también para servicios públicos (rescate o apoyo humanitario), infraestructura (construcción o mantenimiento) y agricultura y silvicultura (pulverizador, siembra) [45].



Figura 4.2.- Volodrone

Al igual que la empresa anteriormente mencionada, existen muchas otras con prototipos del estilo, como es Google con *Wing*, que fue utilizado durante la pandemia para la entrega de papel higiénico y medicamentos en Virginia, EEUU. Durante esos meses, el servicio se convirtió en un éxito, razón por la cual, hoy en día, está siendo utilizado para la entrega de todo tipo de artículos. La envergadura de este dron es mucho menor que el anterior, ya que estamos hablando de entrega de artículos puntuales y necesarios, esta es de 1.2 metros, pudiendo transportar una carga de hasta 1.3 kilogramos. Esta empresa también está operando

con Wing en Europa, concretamente en Finlandia, habiendo realizado ya millones de kilómetros en sus viajes de transporte. La empresa asegura que, además de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y el número de accidentes terrestres, también se reduce hasta un 45% el tiempo de envío [46].

Para finalizar, las empresas DGL y EHang, se asociaron para la entrega de mercancía a través de drones en China. Estos dispositivos son capaces de cubrir hasta 8 km a través del *EHang Falcon* que cuenta con ocho hélices en cuatro brazos pudiendo transportar hasta 5kg de peso. Para la recogida y entrega de los paquetes son utilizados unos gabinetes explícitamente contruidos para ello, los cuales permiten el escaneo, clasificación y almacenamiento de los paquetes, contando, además, con reconocimiento facial.

EHang Falcon comparte muchas características con los eVTOL previamente estudiados, ya que cuenta con un sistema redundante y módulos de control de vuelo [47].



Figura 4.3.- EHang Falcon y gabinete inteligente [48]

#### 4.1.1.1. Infraestructura necesaria

Considerando que existen dos tipos de envío de paquetería, se van a comentar los requisitos infraestructurales para cada uno de ellos:

- Servicio de paquetería al usuario final: en este caso, es necesario desarrollar un método de entrega directa al usuario, donde nos podemos encontrar con numerosos

problemas, ya que es necesario considerar factores externos, como la vida animal o la propia vida humana, ya que necesitamos asegurar al cliente que es un método completamente seguro.

El sistema que se va a utilizar para estos casos debe cumplir ciertas pautas legislativas, por lo que el dispositivo no debe superar los 50 metros de altura, de esta forma, nos aseguramos la interferencia nula con el tráfico aéreo. Además, debe operar por debajo de los 100m/s. Para evitar cualquier tipo de problema humano, la nave no aterriza para la entrega del paquete, sino que se posiciona a una altura de 5-7 metros y, mediante un sistema extensible, se permitirá la entrega de la carga.

Por ello, se va a aplicar algo similar al siguiente esquema:

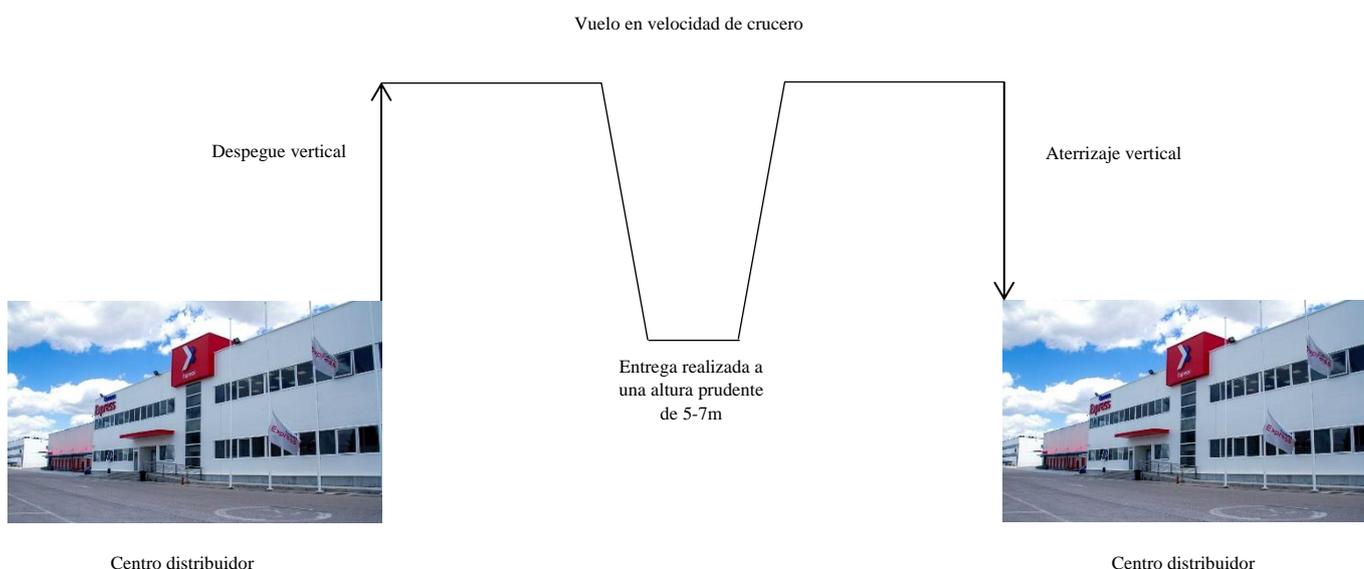


Figura 4.4.- Entrega de paquetería a particular, elaboración propia

La infraestructura que deberán de poseer todos los centros distribuidores, ya sean de paquetería como tal, supermercados o cadenas de comida, no tiene por qué ser muy compleja, debido a que el dron no estará estacionado en ellas esperando a ser utilizado, sino que, en caso de existencia de algún tipo de pedido, automáticamente irá a su recogida y a su posterior entrega.

Es decir, estos centros deberán tener Vertiports aislados y no numerosos para un correcto funcionamiento, similar a los estudiados en puntos anteriores. Contarán con varias FATO para su operación.

- Servicio de paquetería a centro distribuidor local: la infraestructura que necesitaran estos centros distribuidores será mucho mayor y compleja, ya que en ellos estarán estacionados los drones para su utilización cuando sea pertinente. De esta forma, deberán de contar con puntos de recarga y estacionamiento y diversas FATO para depender qué tipo de transporte se vaya a realizar.

El funcionamiento teórico de este tipo de transporte consiste en la llegada de la paquetería a centros distribuidores locales, para los que no existe legislación específica. Por ello, de la misma manera que consideramos a los eVTOL performance de Clase 1, los drones van a aplicar las características de una performance de Clase 3 [49].

Como comentado, no existe una infraestructura estudiada y aprobada para este tipo de transporte, pero un posible diseño podría ser el siguiente:

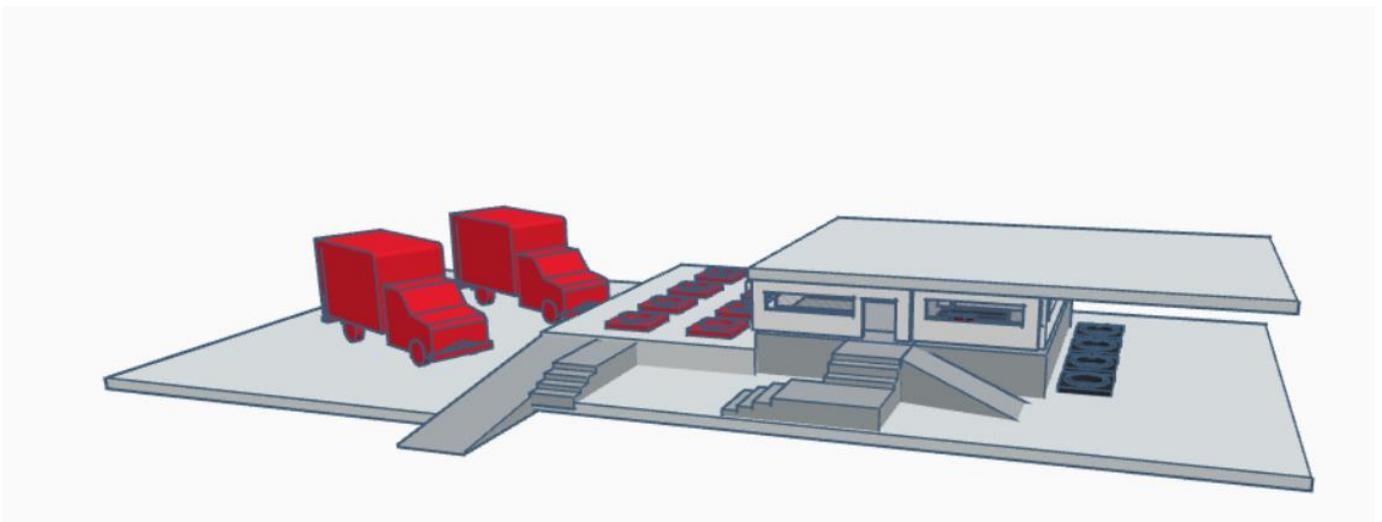


Figura 4.5.- Servicio de paquetería local, elaboración propia

En el grafico superior, podemos observar las zonas de estacionamiento para la carga y la descarga de los drones (rojo) y, representado en color negro, las estaciones de carga y reparación de estos.

De esta forma, los camiones con mercancía llegan al centro distribuidor, donde se almacenan y clasifican y se preparan los pedidos necesarios, que serán cargados en los drones en la zona de estacionamiento para su posterior despegue.

#### 4.1.1.2. Ventajas y desventajas

Las ventajas que puede suponer la implementación de un sistema como el comentado son innumerables, no solo por la rapidez de llegada a destino, sino también por la descongestión masiva de carreteras y, por supuesto, la reducción de emisiones contaminantes, debido a que el transporte de mercancías supone un alto tanto por ciento de las emisiones totales.

Como en cualquier tipo de ámbito, lo novedoso viene con multitud de obstáculos que imposibilitan la integración en el mundo real al inicio. Es por eso, que nos enfrentamos a desventajas, entre ellas cabe destacar [46]:

- Falta de reglamento específico, hasta que los organismos actuales no trabajen en la consolidación de una legislación que contemple estos ámbitos, por mucho desarrollo tecnológico existente, nunca va a haber una correcta implementación.
- Seguridad, existen numerosos obstáculos artificiales y naturales, muchos de ellos no son permanentes, por lo que puede suponer un problema el vuelo de drones en determinadas zonas. Y, en un futuro, cuando los eVTOL se hagan realidad, estos drones de reparto deberán compartir el espacio aéreo disponible con ellos.
- Mal funcionamiento, hemos comentado la implementación de un dron que puede llevar hasta 200 kilogramos de carga, por lo que un pequeño fallo puede suponer una catástrofe.
- Costes del reparto, debido a, que sin una estrategia adecuada para el mismo, existe la posibilidad de que al cliente no le merezca la pena pagar más por el reparto.

#### 4.1.2. Transporte público eficiente: rutas predeterminadas

Este punto presenta la base del inicio de una generación de transporte aéreo eficiente, debido a que, en las primeras fases de desarrollo de la Movilidad Aérea Urbana, se utilizarán servicios con rutas y horarios preestablecidos, únicamente para una progresiva inclusión de este medio de transporte.

Utilizando un servicio de rutas preestablecidas, conseguimos una disminución de la complejidad de la infraestructura terrestre necesaria y también de la adaptabilidad del vuelo. Será mucho más sencillo poder, más adelante, incluir un servicio de taxi en el que el propio pasajero podrá elegir la localización de salida y de llegada.

Este tipo de transporte se asemeja a las opciones de transporte público actuales (metro, autobús...), con sus rutas determinadas, horarios y paradas. Estas paradas se realizarán en las zonas más necesarias, aeropuertos, estaciones de cualquier tipo o centro de las ciudades.

Los estudios realizados sobre la implantación de este servicio público plantean el uso de eVTOL con las siguientes características:

Tabla 4.2.- Características de eVTOL de uso público, rutas predeterminadas

<b>Tipo de eVTOL</b>	Autónomo con capacidad para entre 2-5 pasajeros
<b>Carga útil</b>	500 kg
<b>Distancia máxima por viaje</b>	160 km
<b>Rutas</b>	Rutas preestablecidas, con horarios fijos entre puntos de alta congestión
<b>Infraestructura necesaria</b>	Vertiports, con su determinado punto de carga y reparación
<b>Tecnología implantada</b>	LIDAR, NVIS, baterías
<b>Requerimientos</b>	BVLOS, requerimientos legales (aplicables los de Performance Clase 1)
<b>Tecnología competidora</b>	Metro, bus, vehículo personal

A continuación, expongo un conjunto de rutas posibles para la implantación temprana de esta tecnología en Madrid considerando los 15 puntos “negros” de tráfico en la ciudad [50]:

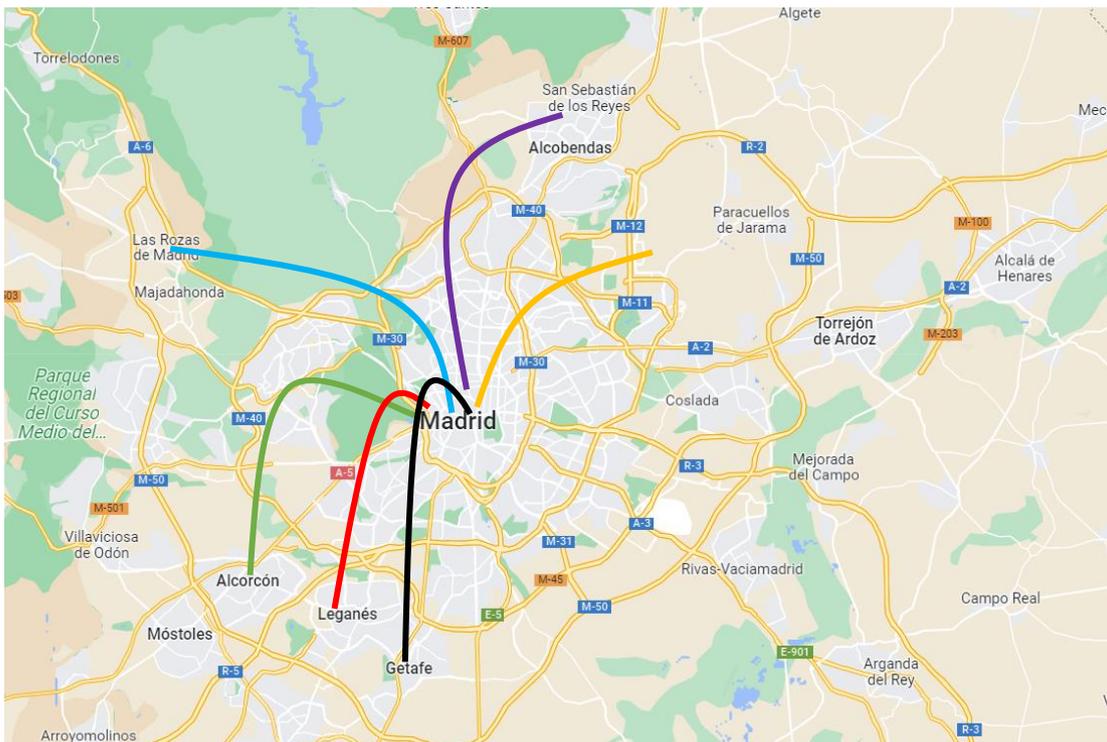


Figura 4.6.- Ejemplo de rutas preestablecidas, Madrid. Elaboración propia

Con la implementación de las diferentes 6 rutas mostradas anteriormente, conseguimos descongestionar las principales autovías y circunvalaciones en las que, cada día, miles de personas pierden horas de su tiempo. Todas estas líneas están dirigidas al centro de la ciudad, donde se dispone de un servicio de metro considerado eficaz hasta la fecha.

#### 4.1.2.1. Infraestructura necesaria

La infraestructura necesaria para llevar a cabo este tipo de transporte público ha sido comentada y explicada en el punto 3.1.1 de este proyecto, y son los Vertiports.

Este tipo de puerto de eVTOL están localizados en el centro de las ciudades o donde más demanda diaria existe de recepción y envío de pasajeros. Como ya fue comentado, están dotados de puestos de recarga y mantenimiento rápido en caso de surgimiento de algún problema técnico. Como recordatorio, su infraestructura visual es la siguiente:



Figura 4.7.- Recordatorio de vertiport, elaboración propia

Estos puertos están situados en zonas elevadas de la ciudad, como en las azoteas de los edificios. En caso de aeropuertos, estarían situados también en los techados de los parking existentes en ellos, o bien en zonas de despegue y aterrizaje predispuestas en las pistas de estos. Para poder aclarar la ubicación de estos, debe existir una legislación regulatoria.

#### 4.1.2.2. Ventajas y desventajas

A corto plazo, considero que este sistema puede llegar a ser el más apreciado por el ciudadano, debido a la alta congestión en las grandes ciudades. La pérdida de tiempo de un ciudadano en una ciudad como Madrid durante un año equivale a una semana completa [51], por lo que estaríamos ganando muchas horas con la aplicación de un sistema como el estudiado.

Estamos hablando de una diferencia de tiempo abismal, mientras que en la actualidad desde el centro de Madrid hasta el aeropuerto de Barajas se tarda alrededor de 45 minutos, con el uso de este sistema no llegaría a 10.

Las desventajas son similares para todos los tipos de aplicación de los eVTOL en la actualidad, ya que falta un camino grande de desarrollo tecnológico, infraestructural y gubernamental para poder hacerse realidad.

#### 4.1.3. Transporte diario en ciudad: servicio de “taxi”

El caso de uso de los eVTOL como taxis aéreos es una operación de transporte compartido de puerta a puerta, de manera que permite a los pasajeros solicitar un eVTOL al lugar deseado y especificar el destino en el tejado de una parte de la ciudad o de una ciudad en particular.

Como se comprenderá al finalizar este punto del proyecto, se espera que los primeros eVTOL de pasajeros comerciales comiencen a prestar servicio a partir del año 2025, una vez integrado el servicio de movilidad pública de rutas predeterminadas.

Se espera que el servicio de taxi en un principio esté dedicado a conectar aeropuertos con las zonas centro de las ciudades más congestionadas del planeta para unos clientes específicos, empresarios concretamente. Es por ello, que no se espera que hasta el año 2035 este servicio esté completamente integrado para todo tipo de pasajeros.

La principal problemática que puede surgir en la implantación de estos servicios no es el congestionamiento del aire, sino el de las estaciones de carga y descarga de pasajeros, esta es la razón por la que debe ser una infraestructura diseñada inteligentemente.

Existen tres principales factores determinantes en la conducción al éxito o al fracaso de la inclusión de los eVTOL como medio de transporte humano:

- Fecha de inicio de pruebas, desarrollo de la tecnología
- Capacidad de modificación entre generaciones eVTOL
- Tasa de inclusión en las diferentes partes del mundo

Se puede dividir el servicio de taxi, a su vez, en dos vertientes, debido a que las características del eVTOL no van a ser las mismas para un vuelo **urbano** y para un vuelo **interurbano**.

Y, como a lo largo de todo el proyecto, surge la dificultad de la construcción de baterías lo suficientemente eficientes y potentes como para poder realizar un viaje entre ciudades sin problema.

Tabla 4.3.- Características de un eVTOL de servicio taxi

<b>Tipo de eVTOL</b>	Autónomo con capacidad para entre 2-5 pasajeros
<b>Carga útil</b>	900 kg
<b>Distancia máxima por viaje</b>	110 km, con variaciones dependiendo del tipo de vuelo
<b>Rutas</b>	Rutas no establecidas, con horarios a demanda y en cualquier momento
<b>Infraestructura necesaria</b>	Gran cantidad de vertipuertos, puestos de recarga y reparación
<b>Tecnología implantada</b>	LIDAR, NVIS, baterías
<b>Requerimientos</b>	BVLOS, requerimientos legales (aplicables los de Performance Clase 1)
<b>Tecnología competidora</b>	Metro, bus, vehículo personal, avión, helicóptero

#### 4.1.3.1. Infraestructura necesaria

Para la consecución de la integración de estos servicios, la mayoría de las empresas desarrolladoras se centran en el uso de la infraestructura existente. Para poder desarrollar una infraestructura completa, es necesario conocer varios factores, entre ellos la estimación de la demanda de pasajeros de estos servicios [52]. El cálculo de comentado dato se podría realizar sabiendo el número de pasajeros que reciben, por ejemplo, un aeropuerto diariamente, y focalizarse en uno de los días que más congestión exista, pero nunca el día que más.

Debido a la inexistencia de regulación específica de eVTOL, nos centramos en el Anexo 14 de la OACI, concretamente en el Volumen II Helipuertos y en el Manual de Helipuertos DOC 9261 de la OACI, donde se indica la obligatoriedad de la existencia de, al menos, una FATO (para aterrizar y despegar), y de varios puestos de estacionamiento.

Para poder concluir en el número de FATOS necesarias, debe realizarse un estudio de obstáculos y de necesidad de dimensionamiento, lo que depende del lugar de establecimiento.

Por otro lado, para definir el número de puestos de estacionamiento, es necesario conocer el tiempo empleado en un ciclo de aterrizaje y despegue de una aeronave, considerando el tiempo que tardan los pasajeros en subir y bajar y también el tiempo de carga de baterías.

Según un estudio realizado por *Deutsche Flugsicherung GmbH*, el tiempo medio total por ciclo de despegue y aterrizaje es de alrededor de 6 minutos, mientras que el de carga de

baterías, si consideramos el sistema innovador introducido en el proyecto, sería de alrededor de 10-15 minutos. Con estos datos podemos concluir:

- Capacidad de cada FATO para 10 aeronaves a la hora
- Capacidad de cada puesto de estacionamiento de 4 aeronaves a la hora

$$Puestos\ de\ estacionamiento\ necesarios = \frac{Capacidad\ FATO}{Capacidad\ de\ cada\ puesto} \quad (4.1)$$

Por lo que podemos considerar la necesidad de 3 puestos de estacionamiento por cada FATO existente. Una problemática que puede surgir por el establecimiento de estos servicios en zonas tan congestionadas es la selección de la zona donde establecer el puerto, para ello, es necesario considerar:

- Accesibilidad
- Obstáculos
- Capacidad de expansión
- Impacto de ruido en los alrededores

Con estos datos, podemos considerar un posible diseño de estación de aerotaxis con, por ejemplo, la existencia de 2 FATO, de la siguiente manera:

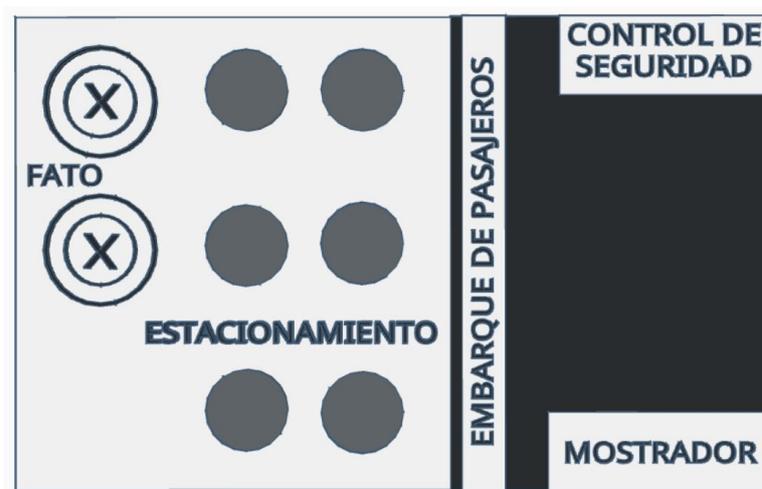


Figura 4.8.- Ejemplo de diseño estación taxi, elaboración propia

#### 4.1.3.2. Ventajas y desventajas

Existe una baja probabilidad de que los taxis aéreos sean rentables antes del año 2030 para el consumo generalizado, pero existen posibles escenarios que hacen ver que es un servicio viable en el futuro. La mayor dificultad a la que nos enfrentamos para su implantación a corto-medio plazo es la existencia de una infraestructura lo suficientemente expandida para que un eVTOL tarde menos de 3 minutos en llegar a la parada solicitada.

Pero, sí que existe una oportunidad cercana de rentabilidad implementando un pequeño número limitado de vertipuertos que pueda servir a poblaciones limitadas, es decir, la utilización del servicio para empresarios y personas con capacidad económica suficiente. De esta manera, surge un catalizador de mercado futuro para una población más amplia.

#### 4.1.4. Transporte de enfermos: respuesta de emergencia

Nos enfrentamos en este punto a uno de los mejores servicios que puede llegar a ofrecer esta tecnología de transporte aéreo autónomo. Además de una utilidad muy interesante, también estamos ante la más complicada de llevar a cabo.

Existen dos vertientes diferentes de ambulancia aérea, una cercana y una lejana. La más cercana es el uso de los eVTOL como apoyo en casos de accidentes terrestres para la llegada rápida de ayuda al lugar de los hechos. Esto es debido a que los proyectos de eVTOL en desarrollo no están preparados para hacer el servicio de ambulancia.

La otra vertiente, la cual es un proyecto a largo plazo, es la medicalización completa de este tipo de aeronaves, pero hasta el momento no será necesario por los proyectos que van a ser comentados a continuación.

Para poder entender los presentes estudios, comentar la existencia de **HEMS** (Helicopter Emergency Medical Service), referido al uso de helicópteros para la evacuación y el transporte sanitario, que ha sido en la historia una de las mejores opciones de rescate en casos de accidentes. Su principal problemática es la, en ocasiones, poca maniobrabilidad de dichos helicópteros en ciertas situaciones, costándoles llegar lo más rápido posible al lugar necesario. Es por ello por lo que surge la colaboración de dicho sistema con las aeronaves eVTOL, las cuales pueden proporcionar los fallos que surgen en el uso de las ambulancias aéreas actuales. No es necesario comentar en que las ventajas que presenta un sistema de

aeronave eléctrica de aterrizaje y despegue vertical están incluidas el uso de sistemas completamente eléctricos y redundantes.

Surge entonces, una colaboración previamente comentada, entre *ADAC Luftrettung* (principal empresa alemana de construcción de helicópteros médicos) y Volocopter, para la realización de un estudio de viabilidad del uso de vehículos eVTOL en funciones HEMS. Dicha empresa alemana busca reducir al máximo posible los tiempos de respuesta, y es donde entra el uso del apoyo del eVTOL [53]. De esta manera, la forma de actuar en caso de emergencia sería la siguiente:

1. Llegada del eVTOL al lugar de los hechos en el menor tiempo posible, llevando consigo lo imprescindible:
  - a. Médico a bordo
  - b. Equipo básico
2. Llegada de la ambulancia o helicóptero medicalizado para la evacuación al centro médico

De esta manera, consiguiendo reducir los tiempos de llegada, se consigue salvar muchas vidas en riesgo. La empresa ADAC ha invertido en la compra de dos VoloCity para comenzar con las pruebas operativas en el año 2023.

Se exponen a continuación las características técnicas que requiere y tiene el prototipo realizado en colaboración con la HEMS y una imagen del mismo [37].

Características del eVTOL de rescate ambulatorio:

- **Capacidad meteorológica y de vuelo nocturno:** debe garantizar la disponibilidad de un equipamiento técnico adecuado para su vuelo en cualesquiera situaciones, de esta manera, debe estar equipado de sistemas de batería suficientes de acuerdo con los vuelos de Performance de Clase 1 al que pertenece, sistema LIDAR, visión nocturna (NVIS), comunicaciones.
- **Pilotado:** en un principio, es un eVTOL con capacidad autónoma pero pilotado, a bordo irían el piloto de la nave y un médico preparado para rescate humanitario.
- **Equipamiento de vuelo:** asegurar un tren de aterrizaje adaptable a cualquier situación, protección contra hundimiento y contra inclinaciones, radios digitales (BOS), sistema de previsión de colisiones, sistema global de gestión de tráfico.

- **Especificaciones de la aeronave:** hasta 500 kilogramos de carga útil con una la posibilidad de recorrer una distancia de aproximadamente 180 kilómetros.



Figura 4.9.- eVTOL de Volocopter de transporte medicalizado [54]

#### 4.1.4.1. Infraestructura

Al contrario que en otros casos de integración del eVTOL como medio de transporte, hablando del uso de este como transporte medicalizado, existen estudios muy exhaustivos de cómo debe ser la infraestructura necesaria, tanto de la nave como de la estación. Es por ello por lo que a continuación se detallan todos los requerimientos que debe poseer la estación que recoge a estos medios de transporte:

- Oficina para dos personas
- Salón y cocina para dos personas
- Servicio de baño y vestuarios separados por sexo con ocho taquillas cada uno
- 2 salas de relajación con ducha húmeda
- Sala higiénica con lavadora y secadora
- Almacén médico y técnico
- Hangar con plataforma de aterrizaje
- Aeródromo (FATO)
- Unidad de suministro de energía y reparación de la aeronave

Comentando brevemente el suministro de energía, se está estudiando que, para los primeros usos de estas aeronaves, se utilicen sistemas híbridos previamente comentados para asegurar la correcta funcionalidad de estos y disminuir posibles problemas de energía en vuelo.



Figura 4.10.- Construcción exterior de una estación de eVTOL medicalizado

Para poder asegurar la suficiente capacidad energética de las aeronaves en todo momento, es necesario, además de disponer de varias unidades de batería, estas deben cargarse siempre después de cada maniobra.

Para ello, es necesaria la existencia de un sistema de carga inteligente, de manera que, para poder aprovechar al máximo la capacidad de las baterías, estas nunca sean almacenadas al 100% de capacidad, sino que sean capaces de cargarse al máximo poco antes de su próximo uso. Para un mejor uso, o un uso más inteligente, es necesaria la existencia de una batería cargada en la base cuando la aeronave regrese. Para poder aprovechar al máximo sus capacidades y dañarla lo menos posible, se podría implementar en estos casos el prototipo de baterías comentado anteriormente, donde se produce un calentamiento de esta para su carga rápida.

En caso de implementación del sistema de carga comentado, sería necesaria la existencia de bases de carga con potencia de hasta 400kW considerando la energía específica estudiada en otros puntos de 350 Wh/kg. De esta manera, se consigue una batería completamente cargada en alrededor de 10 minutos.

A continuación, y para finalizar, se expone un posible diseño de la estación:



Figura 4.11.- Vista en planta de estación ambulatoria, elaboración propia

#### 4.1.4.2. Ventajas y desventajas

El servicio aéreo ambulatorio es uno de los proyectos más ambiciosos que existen en desarrollo en la actualidad, y por ello conlleva multitud de ventajas y de desventajas. En este momento, considero que antes de hablar de desventajas, habría que hablar de problemas técnicos que surgen y a los que hay que buscar una solución.

Como ventaja, cabe destacar el potencial que puede llegar a tener la implantación de este sistema para el salvamento de miles de personas cuando están en un momento tan crítico. La vida de una persona implicada en un accidente de tráfico o en cualquier tipo de desastre depende, sobre todo, del tiempo que pasa hasta que llega la ayuda, dos minutos de diferencia pueden ser cruciales en su salvamento.

Por ello, creo que la única ventaja, y la más importante que cabe destacar, es el salvar vidas.

Los inconvenientes que surgen y que seguirán surgiendo son varios, entre ellos encontrar una fuente de energía lo suficientemente potente para la consecución de viajes de rescate sin

la preocupación de quedarse sin batería. Es por esta razón que los estudios demuestran que en la implementación temprana de este sistema serán usados sistemas híbridos, ya que, como se puede ver a continuación, ofrecen una mayor fiabilidad y, además, el tiempo que tardan en llegar al lugar es menor [55].

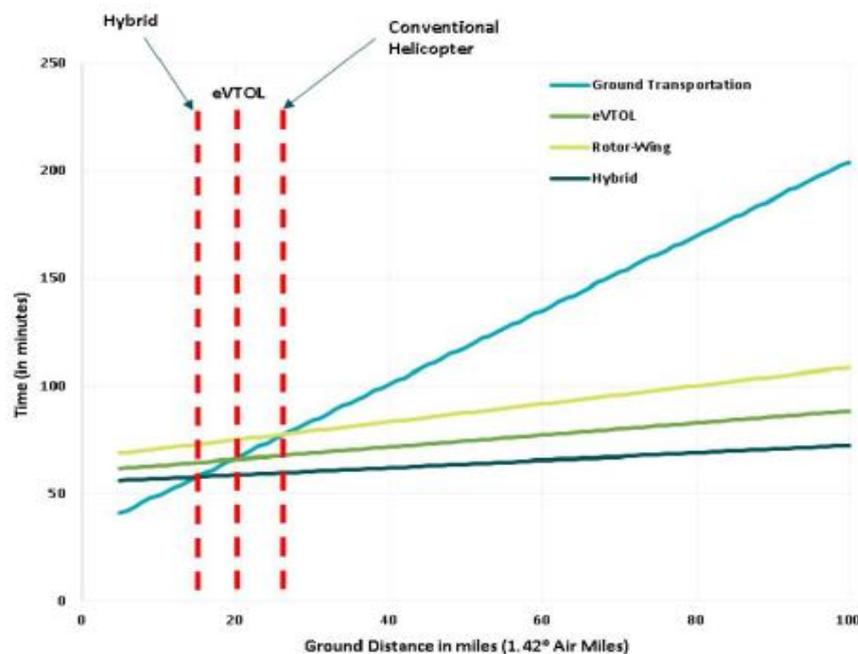


Figura 4.12.- Comparativa de llegada entre distintas tecnologías de energía VTOL

#### 4.2. Proyectos actuales en desarrollo y sus empresas fabricantes

Cada vez más empresas están desarrollando VTOLs eléctricos debido a la, cada vez mayor, demanda de medios de transporte aéreos urbanos. Existen muchos prototipos construidos y en funcionamiento, pero aún no existe un modelo definitivo y completamente eficiente en todos los sentidos requeridos. A continuación, se van a exponer las diferentes empresas más avanzadas en el camino de la construcción del eVTOL, entre ellas se encuentran Lilium, Joby Aviation, EHang y Volocopter.

#### 4.2.1. Empresa Lilium

En primer lugar, la empresa Lilium [56], desarrolla un modelo al que llaman **VTOL jet**. Este cuenta con tres diferentes configuraciones de asientos para la adaptación del cliente o de la situación. La cabina puede configurarse para 4 asientos con mucho espacio, para 6 o bien para el transporte logístico de mercancía cero emisiones. En cada una de sus alas delanteras cuenta con 6 propulsores y 12 en las traseras, estos rotan de manera solidaria con la finalidad de apuntar bien hacia el suelo o hacia atrás. Se han realizado sus primeros test de vuelo con éxito a la hora del despegue vertical, pero el principal problema con el que se encuentran es con el vuelo en horizontal. La empresa comunicó que para el año 2025 esperan contar con un modelo completamente funcional.

El diseño propuesto por esta empresa es completamente diferente a los de las que comentaremos a continuación, ya que apuesta por la implementación de 36 rotores, que en un principio, pueden aumentar el gasto energético y un menor empuje. Esto tiene una razón, y es que es una empresa no orientada al transporte urbano o al servicio de taxi, sino que persigue el desarrollo de un prototipo con la capacidad suficiente para realizar vuelos regionales a una velocidad de hasta 300 km/h, ya que, hasta el momento, promete una autonomía de 200 kilómetros.

Esta ambición se traduce en que, aunque si es cierto que su diseño necesita de mucha más energía en vuelo estacionario, la existencia de bancos de ventiladores permite la baja resistencia al vuelo horizontal.

Según los líderes de esta empresa, la principal ventaja en la que se apoyan es en la reducción de hasta 10dB en comparación con los eVTOL de rotores abiertos, y prometen tener la capacidad suficiente para poder aumentar el número de pasajeros hasta los 16.

Resumiendo, su tecnología está basada en el uso de una tecnología denominada **DEVT** (*Ducted Electric Vectored Thrust*), la que utiliza motores eléctricos a reacción integrados en los alerones de la nave. Estos motores de reacción eléctricos se basan en un único sistema rotor/estator (parte fija del alternador sin movimiento donde se alojan las bobinas inducidas generando corriente eléctrica) de una sola etapa accionados por un motor eléctrico [57].



Figura 4.13.- Lilium Jet [58]

#### 4.2.2. Empresa Joby Aviation

Joby Aviation es una de las empresas más relevantes del sector. Está respaldada por Toyota y adquirió Uber Elevate para dominar el transporte público aéreo. Su primer modelo es el S2, que contaba con dos asientos, pero después fue desarrollado el S4, su principal proyecto, de cuatro asientos. Este último prototipo, definido como “Generación 1”, fue ampliado a la “Generación 2”, proyecto que va a ser comentado a continuación y que cuenta con un total de cinco asientos.

En este caso, el modelo cuenta con seis rotores, cuatro en las alas y dos en la cola, y un total de cinco asientos con el piloto incluido. Las hélices son basculantes, y una vez en el aire son aprovechadas para el movimiento en horizontal. El principal problema con el que se encuentra la empresa es con el comportamiento de la aeronave con el máximo de pasajeros o fuertes vientos. Esperan tener listo su servicio para el año 2024 en diversas zonas estadounidenses, ambos modelos comentados están siendo certificados por la FAA.

Su sistema de propulsión eléctrica distribuida (DEP), consigue alcanzar la velocidad de 322 km/h a través de baterías de litio/níquel/cobalto/óxido de manganeso, con lo que consigue una autonomía de 241 kilómetros.

Es una de las empresas con mayor recorrido en el ámbito, siendo así que su último modelo cuenta con:

- Garantía de seguridad superior al certificado CS-23 (Anexo IX)
- Control de vuelo unificado, reduciendo la capacidad del piloto de cometer errores
- Velocidad de crucero de 322 km/h

- Autonomía de 241 km
- 100 veces más silencioso que un helicóptero convencional

Al contrario que la aeronave previamente descrita, la empresa Joby Aviation está desarrollada para su utilización dentro de la UAM, como taxi aéreo, de esta manera, la aeronave no estará a la venta de particulares [59].

Para finalizar con el desarrollo de los prototipos y diseños presentados por Joby Aviation, comentamos a continuación las especificaciones que han sido desveladas por la propia empresa y una imagen de la propia nave presentada.

Tabla 4.4.- Características del eVTOL Joby Aviation, basado en [59]

<b>Piloto</b>	1
<b>Pasajeros</b>	4
<b>Velocidad máxima</b>	322 km/h
<b>Alcance</b>	322 km
<b>Hélices</b>	6 basculantes
<b>Motores</b>	6 eléctricos
<b>Fuente de alimentación</b>	Baterías de óxido de litio-níquel-cobalto-manganeso
<b>Envergadura</b>	10,7 m
<b>Longitud</b>	7,3 m
<b>Peso</b>	1815 kg
<b>Ventanas</b>	Sí
<b>Fuselaje</b>	Compuesto
<b>Tren de aterrizaje</b>	Retráctil
<b>Características de seguridad</b>	DEP, redundancia, energía de reserva



Figura 4.14.- Joby Aviation S4 2.0

#### 4.2.3. Empresa EHang

Por otra parte, el eVTOL desarrollado por EHang es algo diferente. Es una aeronave mucho más pequeña que las anteriores, ya que solo cuenta con capacidad para dos pasajeros y su pilotaje es autónomo. Es una empresa que, hasta el momento, se ha centrado mucho en la extinción de incendios a gran altura, ya que puede transportar hasta 150 litros de espuma contra incendios y seis bombas extintoras en un solo viaje. Dicho eVTOL utiliza una cámara con zoom de luz visible para identificar la ubicación del incendio, flota en su posición y usa un dispositivo de puntería laser para disparar las bombas de extinción de incendios y, a continuación, la espuma. [60]

Uno de los proyectos desarrollados por esta empresa es el EHang Falcon, comentado previamente, dron orientado a la entrega y distribución de paquetería, siendo de sus aeronaves más conocidas.

En cuanto a aeronaves eVTOL, vamos a comentar el EHang AAV, cuyas características principales son la redundancia completa del sistema, autonomía total y control centralizado de mando y control [61].

- La autonomía completa con la que cuenta la aeronave asegura la imposibilidad de fallos humanos.

- El sistema de seguridad implementado en el Ehang AAV, permite la supervisión de todos los dispositivos de la aeronave en tiempo real. Por lo que, en caso de fallo, se selecciona una ruta alternativa basada en la lógica algorítmica.
- Es un eVTOL con rutas preestablecidas, de manera que, existan alternativas en caso de un fallo de cualquier tipo. El uso de 4/5G como medio de transmisión, permite el control remoto de la misma.



Figura 4.15.- eVTOL Ehang

Tabla 4.5.- Características del eVTOL Ehang, basado en [60]

<b>Piloto</b>	Autónoma
<b>Pasajeros</b>	2
<b>Velocidad máxima</b>	130 km/h
<b>Alcance</b>	35 km
<b>Altitud máxima</b>	3000 m
<b>Motores</b>	16 eléctricos
<b>Carga útil</b>	220 kg
<b>Tiempo de recarga</b>	120 min
<b>Ventanas</b>	Sí
<b>Hélices</b>	16
<b>Características de seguridad</b>	DEP, redundancia, multitud de sensores

#### 4.2.4. Empresa Volocopter

Volocopter es la empresa pionera en el vuelo de despegue y aterrizaje vertical, y está orientada a la implementación de estas aeronaves como taxis aéreos, drones de carga pesada y, como se ha estudiado, en colaboración con HEMS, para la fabricación de una aeronave eléctrica de apoyo sanitario.

Han lanzado los proyectos de tres diferentes tipos de aeronaves, que son:

- Volocopter **VoloDrone**: es un dron creado para su utilización mediante rutas preestablecidas en funciones agrícolas o de carga. Consta de railes en su parte inferior, a través de los cuales puede soportar diferentes tipos de carga [62]. Sus principales servicios son agricultura, construcción, logística y servicios públicos.



Figura 4.16.- Volocopter Volodrone

- Volocopter **VoloConnect**: se considera un multicoptero de pasajeros, y ha realizado su primer vuelo en el mes de mayo de este mismo año. Tiene una capacidad para cuatro pasajeros, velocidad de crucero de 180 km/h y una autonomía de 100 km. Cuenta con seis hélices, dos ventiladores, un ala alta y un tren de aterrizaje retráctil [63].



Figura 4.17.- Volocopter VoloConnect

- Volocopter **VoloCity**: probablemente su proyecto más ambicioso, ya cuenta con 4 generaciones de este. Su finalidad y hacia lo que está orientado es para uso como taxi aéreo. La presente aeronave cuenta con 18 hélices de paso fijo y 18 motores eléctricos, volando a una velocidad de 100 km/h con una autonomía de 35 kilómetros. Una gran ventaja de este diseño es el rápido cambio de baterías, en apenas 5 minutos, por lo que se consigue un servicio casi continuo [30]. Cabe destacar:
  - Seguridad: gracias al uso de hélices de paso fijo, el ordenador de a bordo cambia la velocidad de cada rotor para la consecución de despegues o aterrizajes. Sistemas multirredundantes.
  - Ruido: precisamente, gracias al uso de tal cantidad de hélices, se consigue que el ruido procedente de estas sea muy bajo.

Sus principales características técnicas son:

Tabla 4.6.- Características de Volocopter Volocity, basado en [30]

<b>Piloto</b>	1
<b>Pasajeros</b>	1 + equipaje
<b>Velocidad máxima</b>	110 km/h
<b>Alcance</b>	35-65 km
<b>Carga útil</b>	200 kg
<b>Rotores</b>	18 motores eléctricos de CC sin escobillas
<b>Baterías</b>	Packs de baterías recargables intercambiables
<b>Fuselaje</b>	Fibra de carbono
<b>Altura de la aeronave</b>	2,5 m
<b>Diámetro total</b>	11,3 m
<b>Emisiones de ruido</b>	65 dB a 75 m
<b>Características de seguridad</b>	DEP, redundancia



Figura 4.18.- Volocopter VoloCity

## 5. DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO

Nos encontramos en un punto de inflexión al cambio que posibilita la incorporación de sistemas aéreos completamente autónomos y eléctricos en la vida tal cual la conocemos a día de hoy. Existen más de 300 proyectos de aeronaves eVTOL orientados hacia el transporte de pasajeros en modalidad de taxi, y muchas de estas empresas desarrolladoras prometen comenzar a operar en el año 2023 en grandes ciudades. Para que esto sea posible, es necesario mejorar los sistemas técnicos que comprenden estas aeronaves de despegue y aterrizaje vertical, pero también es necesario el desarrollo inminente de una legislación aplicable a ellos.

En este apartado del proyecto, van a ser estudiadas todas las partes que intervienen en estas aeronaves. La mayoría de ellas utilizan configuraciones con varios motores eléctricos, de esta manera, en caso de fallo de uno de ellos, se puede garantizar la seguridad de los pasajeros o la carga. El objetivo final de estas naves es el pilotaje completamente autónomo, sin necesidad de piloto, pero, se presupone que en un principio sean pilotadas manualmente, al menos hasta que los sistemas de evitación de obstáculos y control autónomo estén completamente desarrollados y probados. La obtención de la licencia necesaria para el pilotaje de los eVTOL no debe ser más complicado que la actual del carnet de conducir convencional.

El sistema de vuelo de estos medios de transporte consiste en la introducción de una clave alfanumérica para la inserción de las coordenadas del lugar deseado. El dicho sistema, calculará la mejor ruta existente, teniendo en cuenta obstáculos y condiciones meteorológicas. Como se ha introducido anteriormente, en las primeras generaciones de eVTOLs, será necesaria la presencia de un piloto, el cual no necesitará una licencia muy diferente a la de un helicóptero convencional [64].

### 5.1. Análisis del sistema

En este punto del proyecto, vamos a hablar de los tres principales parámetros que condicionan la entrada de los eVTOL al mundo real, y la mejora que existe en la actualidad de la tecnología existente.

Estos son:

- **Dimensionamiento y diseño energético:** baterías

Nos enfrentamos, de nuevo, al que probablemente sea el mayor inconveniente al que se enfrentan las empresas desarrolladoras, y, también, el ámbito en el que más desarrollo tecnológico se prevé en los próximos años.

Es necesario considerar que la potencia energética que requiere para despegar y aterrizar es mucho mayor que la necesaria en vuelo horizontal, pero esta primera es casi despreciable, ya que hablamos de una maniobra muy corta. Por esta razón, para conseguir un alcance lo mayor posible, es necesario realizar un buen diseño de baterías, motores eléctricos y hélices de los rotores.

En la actualidad, nos encontramos con una densidad de baterías de alrededor de 250Wh/kg, previendo un aumento a 350Wh/kg en los años venideros, pero nunca un valor superior de 400 con la utilizada tecnología de litio.

- **Aerodinámica** de la aeronave

Como veremos más adelante, en el dimensionamiento de las diferentes partes mecánicas de los eVTOL, el diseño aerodinámico determina la relación de sustentación-resistencia.

- **Fuselaje** de la nave: peso, altura, diámetro

Entramos en la búsqueda de los materiales perfectos para la construcción de estas aeronaves. En la actualidad, hablamos de que las naves completamente vacías suman una cantidad de entre el 50-70% del peso total. En el caso de los eVTOL, es necesario reducir al máximo este valor, intentando llevarlo hasta un 30%, y esto se debe principalmente al peso de las baterías que ha de soportar la aeronave.

## 5.2. Análisis electrónico

Una aeronave eVTOL se basa por completo en la electrónica, ya que está presente en todos los controladores de la nave (motores, autónomo), todo ello se encuentra dirigido por el comentado Autopilot 4x, como veremos a continuación

### 5.2.1. Esquema electrónico

Un esquema electrónico general puede ser el siguiente:

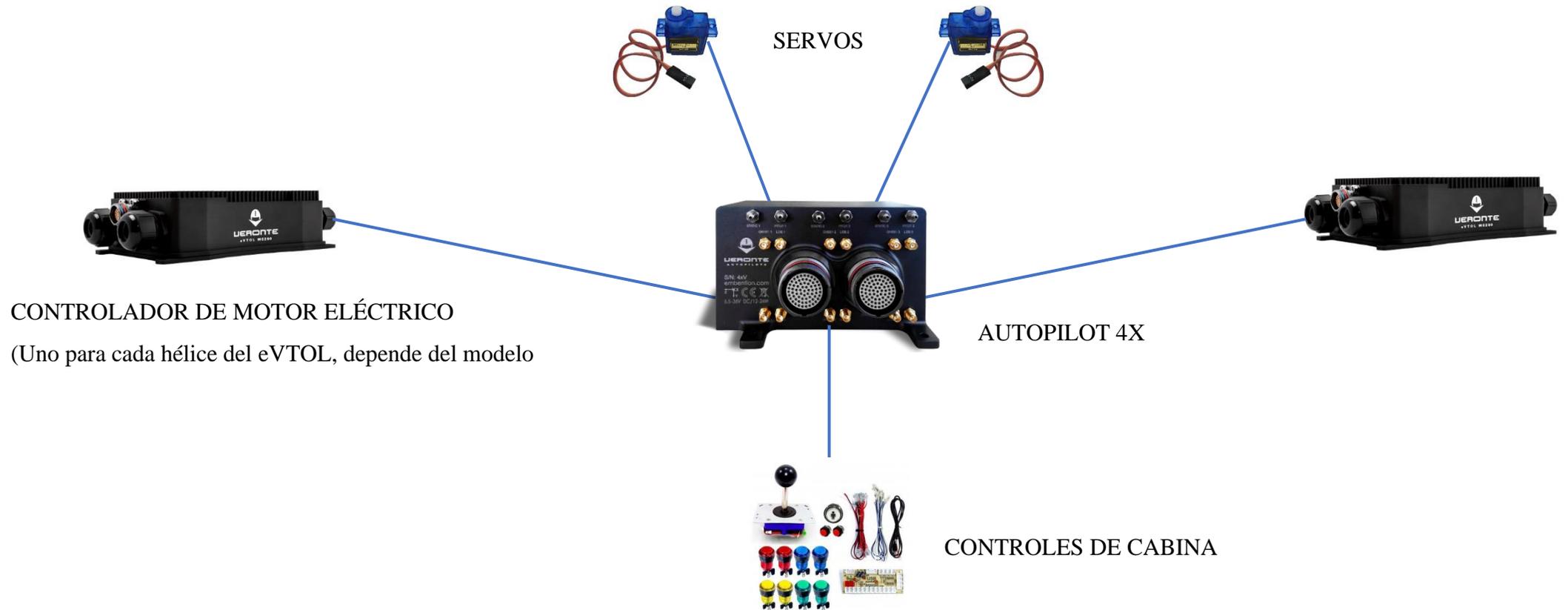


Figura 5.1.- Análisis electrónico sistema eVTOL, elaboración propia

Como se puede observar, es un esquema simple y visual, que nos permite visualizar las partes principales del sistema sin entrar en profundidad.

También podemos ver en él como el Autopilot 4x es el dispositivo que controla todo el sistema, y a continuación podemos ver en un análisis electrónico centrado en las funciones que realiza dicho autopiloto.



Figura 5.2.- Análisis electrónico Veronte 4x, elaboración propia

El autopiloto Veronte 4x, a través del sistema fly-by-wire, nos permite el control manual absoluto desde la cabina a través de una serie de botones y un joystick. Además del control de hasta 32 controladores, entre los que se encuentran los motores eléctricos, servos, frenos y multitud de sensores aplicables.

Es por esta razón que es un dispositivo adaptable, porque puede controlar tal cantidad de controladores, que no importa si la nave de diseño tiene tres o dieciocho hélices con su respectivo motor, que puede controlarlas todas.

Otras de las razones por las que va a ser utilizado desde la primera generación de eVTOLs, es por su capacidad de control con motores eléctricos, híbridos o de combustión.

En cuanto al **procesamiento simultáneo**, hablamos de una arquitectura redundante que cuenta con hasta 4 núcleos de gestión, que permite ejecutar a la vez las acciones requeridas.

Para un completo entendimiento del sistema electrónico de estas aeronaves, a continuación, vamos a comentar la funcionalidad y estructura de cada una de ellas.

### 5.2.2. Componentes

**Sistema de propulsión:** la propulsión eléctrica se ha convertido en el futuro inmediato, no solo por los beneficios medioambientales, sino que, a través de motores de mucho menor tamaño y peso, son capaces de entregar niveles de potencia sorprendentes proporcionando una seguridad y eficiencia muy superior. Esto último es debido a que es una tecnología prácticamente indestructible y con un mantenimiento muy bajo en comparación con un sistema de combustión tradicional.

Para poder explicar la relación peso-potencia en comparación con un motor de gasolina, un motor eléctrico que proporcione 250 CV puede llegar a pesar únicamente 35 kilogramos, mientras que un motor como lo conocemos hoy en día llega a pesar hasta 450 kilogramos, la diferencia es abismal.

La única razón por la que estos motores no son una realidad absoluta a día de hoy es, como ya sabemos, la capacidad energética de las baterías.

Para poder exponer un ejemplo práctico de sistema de propulsión eléctrica, vamos a comentar los motores de la empresa MAGicALL, el modelo MAGiDRIVE, su última generación, incorporando tecnología magnética y electrónica. Se trata de un motor eléctrico sin escobillas, de bajo peso y alto par, consiguiendo un ruido casi inexistente.

Este motor es completamente innovador por la combinación de motor y controlador en la misma unidad. Los modelos existentes se encuentran en el rango de diámetro de 1 a 4.7m, pudiendo producir hasta 300 kW [65].

Tabla 5.1.- Características motor eléctrico MAGiDRIVE [66]

Modelo	6	12	20	40	75	150	300	500
Rango de par	4 -18	9 - 48	20 - 100	45 - 200	90 - 500	200 - 1200	470 - 2400	950 - 5000
Potencia, kW (Corto periodo)	6	12	20	40	75	150	300	500
Potencia, kW (Continua)	5	10	16	32	60	120	240	400
Velocidad, RRP (máxima)	8000	7000	6200	5500	5000	4200	3600	3200
Rango de peso, kg	0,7 - 1,5	1,5 - 3	3 - 6	5 - 10	9 - 19,5	16 - 35	30 - 60	50 - 100
Eficiencia, %	90,5	91,5	92	92,5	93,5	94,5	95,5	96
Diámetro, cm	11	15	19	22	29	38	48	61
Rango de longitud, cm	6 - 9	7 - 10	9 - 12,7	10,1 - 15	11 - 17	14 - 19	15 - 20	17,8 - 25,4

**Sistema autopiloto Veronte 4x:** sistema redundante diseñado para su uso en aplicaciones críticas de la UAM, además de en drones tácticos y plataformas MALE/HALE.

MALE/HALE: *Medium Altitude Long Endurance*, referido a UAVs con altitud menor a 9100 metros y alcance inferior a 200 kilómetros, *High Altitude Long Endurance*, vehículos aéreos de gran autonomía y duración [67].

Para su funcionamiento contiene tres núcleos de autopiloto y una placa de arbitraje para la gestión **redundante**. Para el procesamiento de datos, este autopiloto se interconecta con un ordenador de misión, de esta manera, se consigue intercambiar datos de telemetría entre este ordenador y el de a bordo, existiendo así la posibilidad del envío de rutas entre el exterior y el autopiloto. Conectándose, además, con módulos de enlace de datos (LOS, 4g/LTE (estándar de comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos), Satcom, ADS-B (sistema de vigilancia dependiente autónoma), radar, LIDAR) y demás sensores de detección y evasión. A través de estas interconexiones disponibles, conseguimos una redundancia y garantía de alta fiabilidad, a través de herramientas como vuelo por cámara o silencio de comunicaciones [68].

Lo más interesante de este dispositivo es su software de control, el cual permite su compatibilidad con cualquier tipo de vehículo o aeronave, incluyendo herramientas de personalización para su control y navegación a través de **diagramas de bloques** con librerías como PIDs, control adaptativo, control de energía, operaciones lógicas.

- **Control de cabina:** el control de cabina representado en el esquema electrónico inicial se conecta directamente a este autopiloto a través de un stick de abordaje y un ordenador de misión que ejecuta la interfaz de usuario. Los botones son elementos a mayores que se pueden controlar a través de Veronte para conseguir una nave lo más personalizada posible.
- **Control autónomo:** a través de algoritmos *Rendezvous* y *Relative Mission*. A través del primero de ellos, se consigue que dos usuarios pertenecientes a la misma red cognitiva puedan establecer un enlace de comunicación en el mismo canal, y con el segundo de ellos conseguimos la capacidad de navegación necesaria.

Existe la posibilidad de uso de un cuarto núcleo de autopiloto conectándolo a la etapa de multiplexación con estrategia de votación, existiendo la posibilidad de su uso como ordenador de vuelo, de esta manera, en caso de fallo, existe una solución de respaldo.

- **Seguridad:** como se puede presuponer, cada vehículo o aeronave que pueda utilizar este dispositivo es diferente, por ello, existe la posibilidad de personalización del rendimiento antes cualquier fallo o riesgo de operación, pérdida de localización, fallo de energía... El **controlador de vuelo** incluye multitud de sistemas, entre ellos, DEM mundial, navegación basada en curvas, GNSS, RTK (Navegación Cinética Satelital), control adaptativo, fly-by-camera.
- **E/S ampliadas:** por último, comentar la variedad de entradas y salidas disponibles, entre ellas, CAN Bus, analógica, digital... para la interconexión de cualquier tipo de dispositivo.

Tabla 5.2.- Características técnicas Veronte 4x [69]

<b>Peso / Tamaño</b>	750 g / 117 x 70 x82 mm
<b>Voltaje de operación</b>	6,5 - 36 V
<b>Potencia</b>	17W without M2M 29W with 3.75G M2M 47Wmax with 2G M2M
<b>Cabeceo / Balanceo / Guiñada</b>	0,5 / 0,5 / 1,5 grados
<b>Velocidad</b>	IAS hasta 382 km/h
<b>Sensores</b>	6 Magnetómetros / 9 IMU / 9 barómetros / 3 Pitot / 6 GNSS
<b>GNSS</b>	72 canales, RTK RTCM, GPS, GLONASS, BeiDou
<b>ADS - B</b>	ADS-B in out / sentir y evitar
<b>FCUs</b>	3 unidades de autopiloto + un autopiloto externo opcional
<b>Fuselaje</b>	Aluminio, IP65
<b>Temperatura de operación</b>	- 40 / 65 °C
<b>Puertos I/O</b>	PWM / GPIO / DIGIN / CAN Bus / ADC / EQEP / I2C / USB
<b>Radio Datalink LOS</b>	BLOS Radio1: LOS 2,4 GHz / LOS 900MHz / LOS 400 MHz BLOS Radio2: 3x LOS2,4 GHz BLOS Radio3: 3x LOS 400 y 900 MHz Radio 4 externa
<b>Comunicación BLOS</b>	Módulo M2M LTE
<b>Compatibilidad</b>	Altímetro, detección de obstáculos
<b>Control avanzado</b>	Fly by camera, control adaptativo, navegación basada en curvas

Cada piloto automático Veronte 4x implementa algoritmos de guía y navegación y control del fuselaje en tiempo real, trabajando en superficies de control y sistemas de propulsión, y procesando señales de equipos de sensores.

La conexión de enlace de datos también es una redundancia potencial, es posible instalar tres radios de diferentes frecuencias dentro del piloto automático. Alternativamente, una radio externa puede controlarse como un dispositivo importante usando el puerto serial en el conector de repuesto.

Los tres modelos están gestionados por un microprocesador diferente, incluido el uso de algoritmos encargados de gestionar el módulo de control. El microprocesador compara los datos de todos los módulos en tiempo real y descarta cualquier modelo con un rendimiento inesperado.

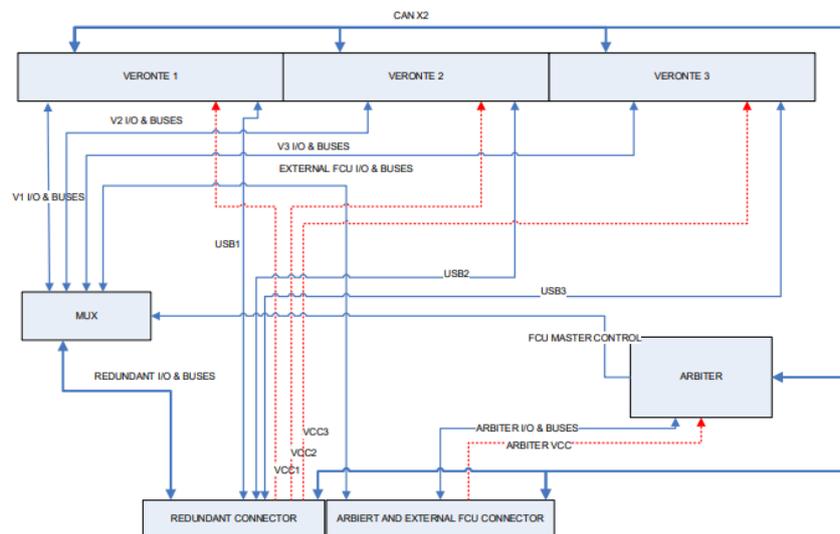


Figura 5.3.- Diagrama de bloques Veronte 4x [70]

A continuación se muestra la estructura (Layout) del conector del Veronte 4x con sus correspondientes pines y la disposición de los pines del conector redundante, para conocer la información sobre cada uno de esos pines, recurrir al Anexo X.

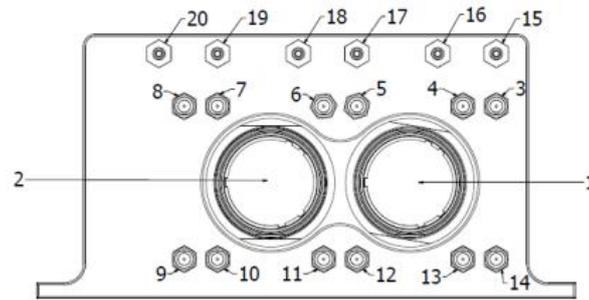


Figura 5.4.- Disposición del conector

Tabla 5.3.- Panel de conexión Veronte 4x

<b>1</b>	Conector redundante (crítico)	<b>11</b>	Conector SSMA GNSS2 para Veronte 2
<b>2</b>	Conector del árbitro (opcional)	<b>12</b>	Conector M2M SSMA para Veronte 2
<b>3</b>	Conector LOS SSMA para Veronte 3	<b>13</b>	Conector SSMA GNSS2 para Veronte 3
<b>4</b>	Conector SSMA GNSS1 para Veronte 3	<b>14</b>	Conector M2M SSMA para Veronte 3
<b>5</b>	Conector LOS SSMA para Veronte 2	<b>15</b>	Puerto de presión dinámica (accesorio 5/64in) para Veronte 3
<b>6</b>	Conector GNSS1 SSMA para Veronte 2	<b>16</b>	Puerto de presión estática (Racor 5/64in) para Veronte 3
<b>7</b>	Conector LOS SSMA para Veronte 1	<b>17</b>	Toma de presión dinámica (Racor 5/64in) para Veronte 2
<b>8</b>	Conector SSMA GNSS1 para Veronte 1	<b>18</b>	Toma de presión estática (Racor 5/64in) para Veronte 2
<b>9</b>	Conector SSMA GNSS2 para Veronte 1	<b>19</b>	Toma de presión dinámica (Racor 5/64in) para Veronte 1
<b>10</b>	Conector SSMA M2M para Veronte 1	<b>20</b>	Toma de presión estática (racor 5/64in) para Veronte 1



Figura 5.5.- Conector redundante de 68 pines Veronte 4x

**Controlador de motor:** un controlador de motor se encarga del arranque y la detención de un motor eléctrico automática o manualmente, además de establecer velocidades, direcciones y controlar el par motor.

Para el estudio del proyecto eVTOL, vamos a hablar del controlador **Veronte MC24**, ya que ha sido explícitamente fabricado para una aeronave de nuestras características. Está basado en ciertos estándares [71]:

- Compatibilidad absoluta con cualquier tipo de motor PMSM trifásico
- Uso de control FOC para la velocidad
- Control de la dirección de los motores

Su funcionamiento se basa en el ajuste del tiempo entre pulsos de corriente, incluyendo freno activo e inversión del sentido de rotación. Es un controlador que implementa estrategias de control avanzadas para desacoplar la generación de par y las funciones de magnetización en los motores, esto es denominado control orientado al campo (FOC), lo que controla las corrientes del estator mediante un vector. Para la consecución de este sistema es imprescindible el conocimiento de la componente de par y la de flujo

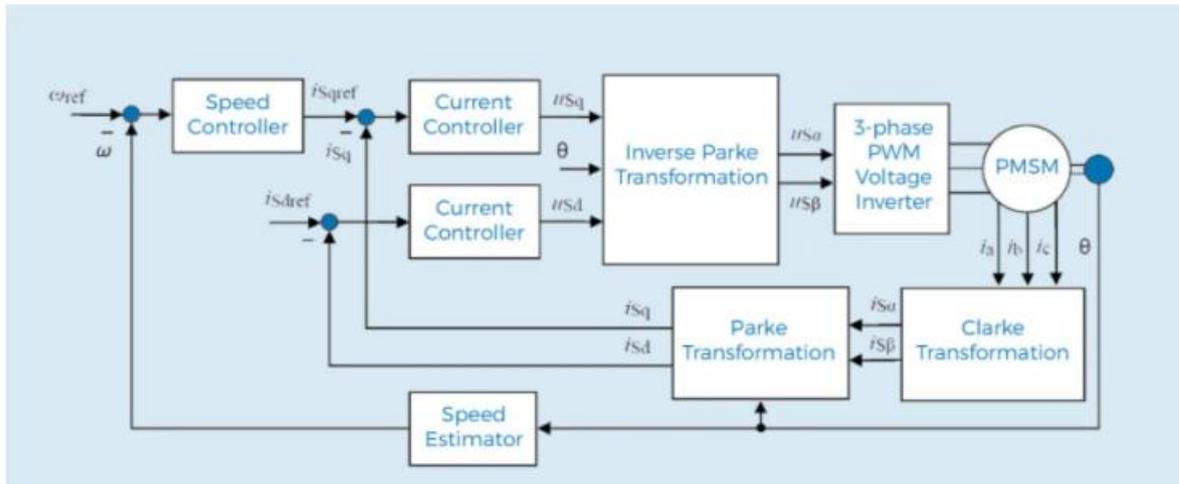


Figura 5.6.- Esquema FOC [72]

Para finalizar con el controlador de motor, a continuación se exponen sus principales características electrónicas. Para una información más precisa, recurrir al datasheet proporcionado a continuación [73]:

Tabla 5.4.- Características eléctricas controlador MC24 [73]

<b>Voltaje de operación</b>	60 - 120V DC
<b>Corriente</b>	5 - 200A
<b>Corriente de pico</b>	400 A
<b>Máxima velocidad</b>	600000 ERPM
<b>Frecuencia PMW motor</b>	20KHz

### 5.2.3. Flujoograma de operaciones

A continuación, se explican los funcionamientos de los principales procesos que realiza el eVTOL en un ciclo de vuelo a través de diagramas de flujo.

### 5.2.3.1. Proceso de despegue

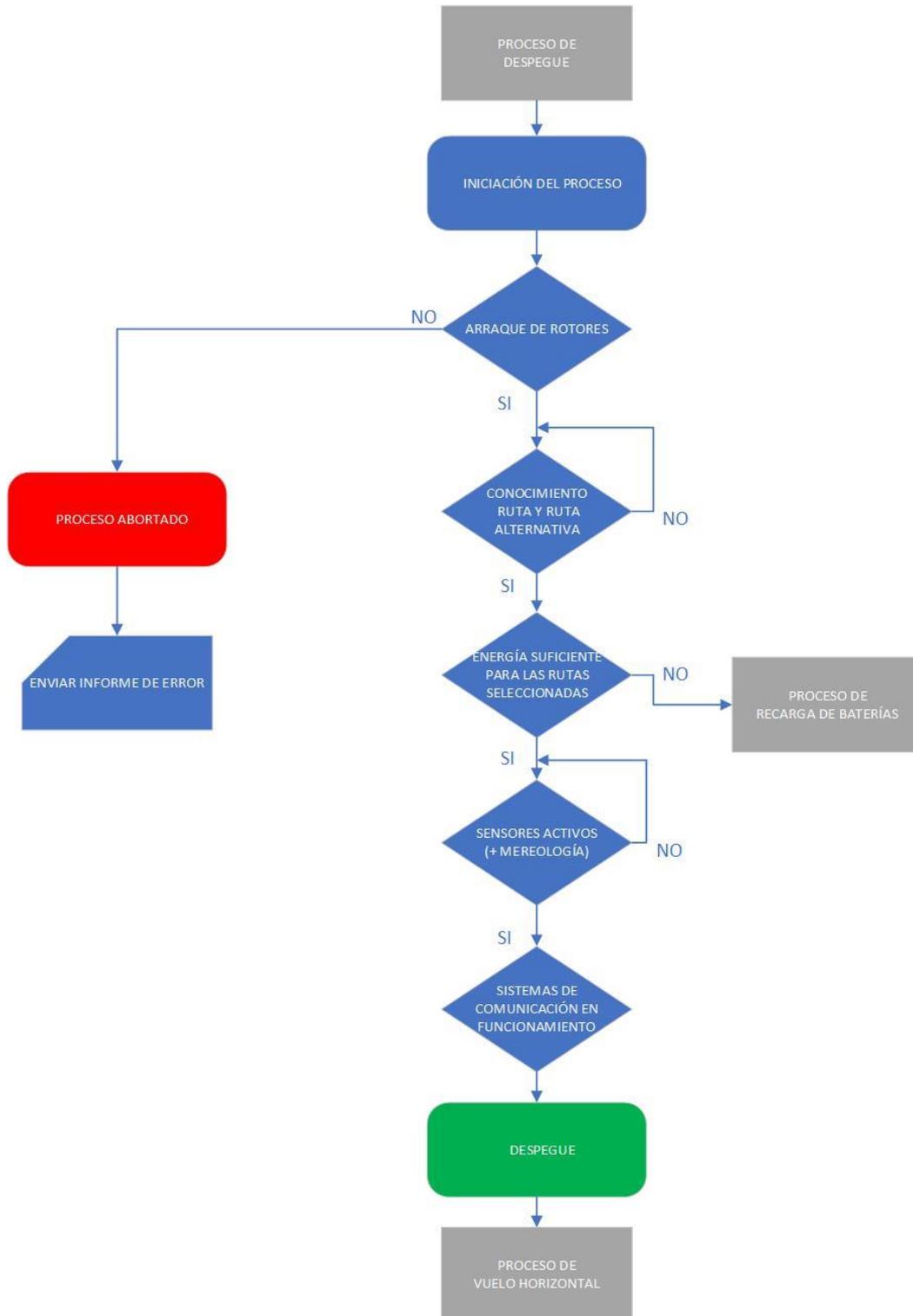


Figura 5.7.- Diagrama de flujo proceso de despegue, elaboración propia

5.2.3.2. Proceso de aterrizaje

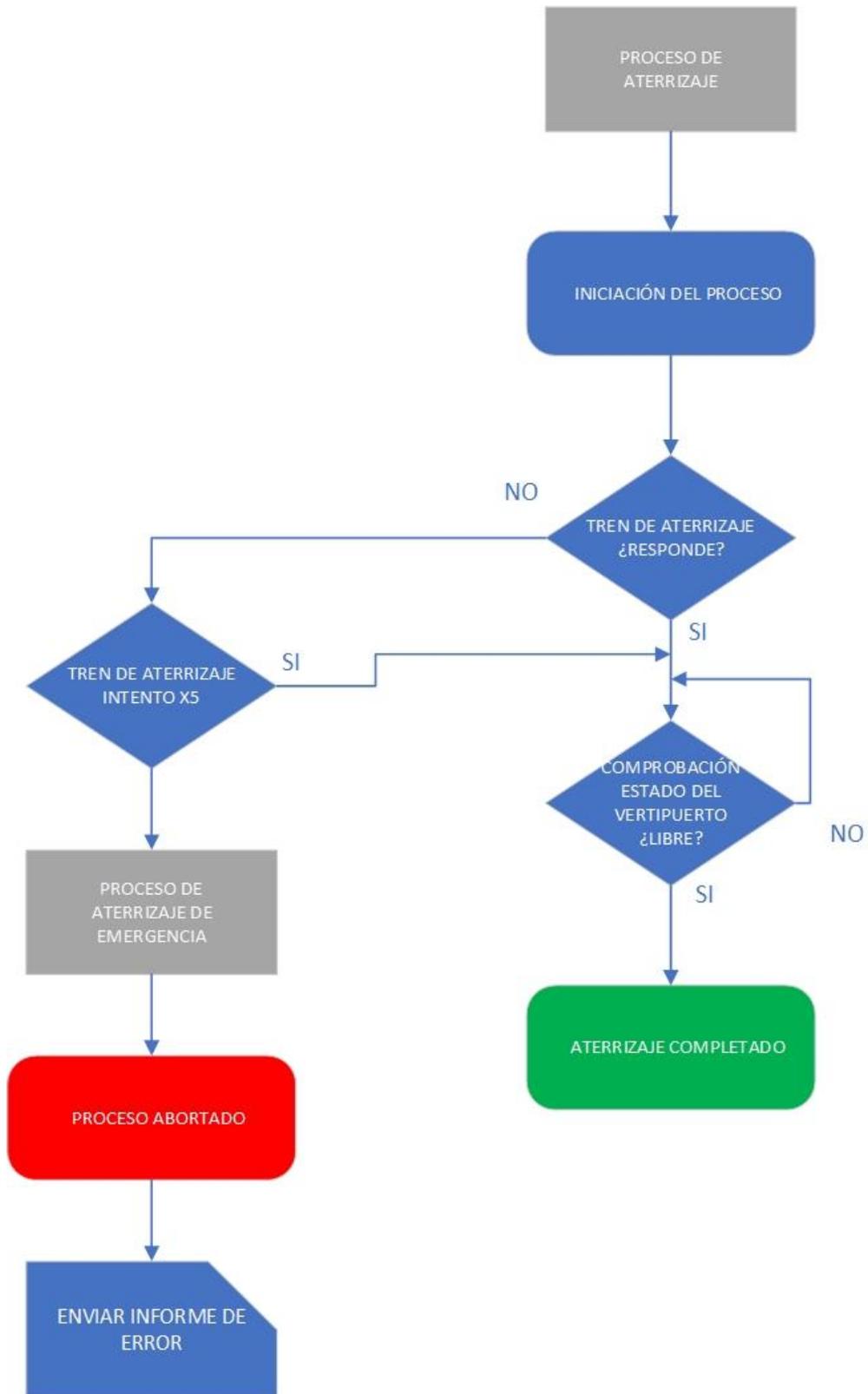


Figura 5.8.- Diagrama de flujo del proceso de aterrizaje, elaboración propia

5.2.3.3. Proceso de aterrizaje de emergencia

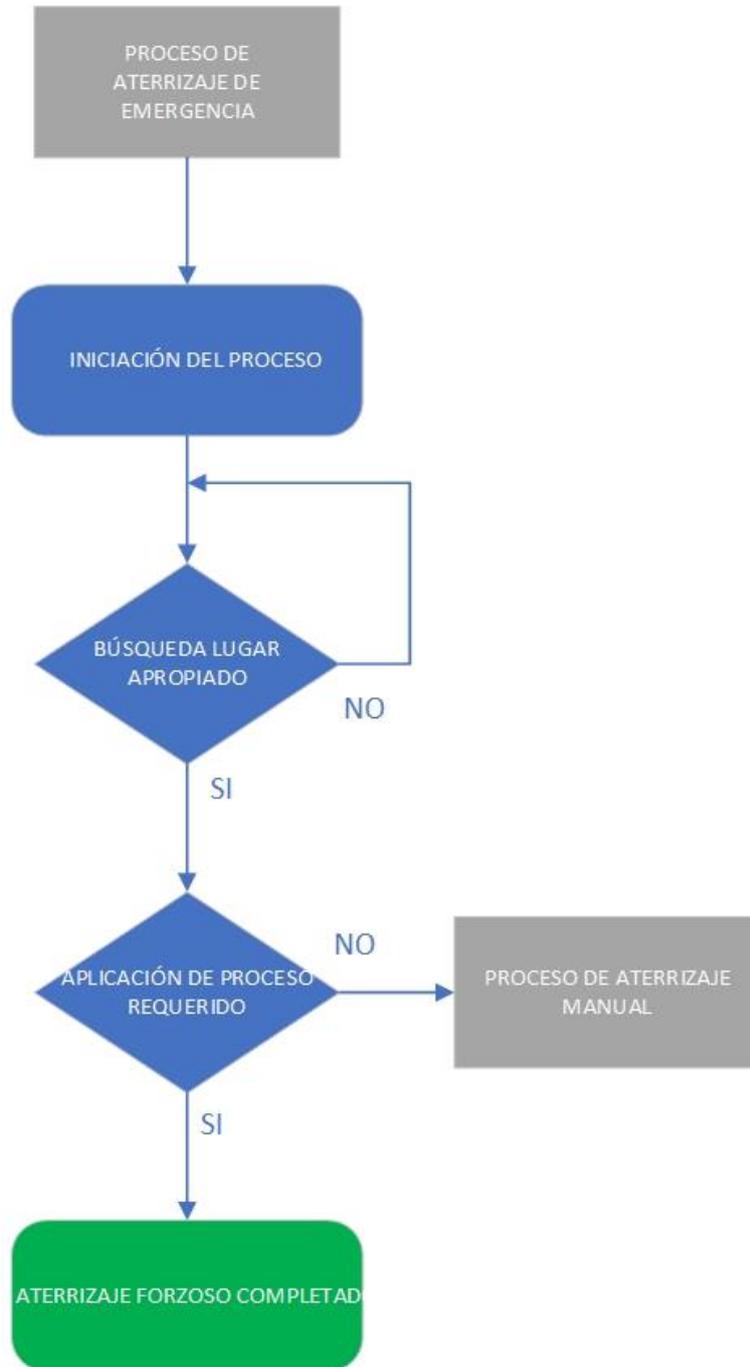


Figura 5.9.- Diagrama de flujo del proceso de aterrizaje de emergencia, elaboración propia

#### 5.2.3.4. Proceso de cambio de ruta



Figura 5.10.- Diagrama de flujo del proceso de cambio de ruta, elaboración propia

### 5.3. Hardware de prototipo

Para el desarrollo de este punto del trabajo, se va a diseñar desde cero, una aeronave eVTOL con las características consideradas mejores en cuanto a la aerodinámica y la funcionalidad del prototipo. Para ello, va a ser utilizado el programa OpenVSP, el cual está orientado al diseño de aeronaves con diseños predispuestos para su consecuente modificación. Van a ser explicadas las estructuras mecánicas que han sido probadas y estudiadas y, por último, la estructura final escogidas y las razones para ello.

Antes de comenzar con la explicación de la estructura mecánica diseñada, la elección del uso de 6 hélices y 6 rotores es porque, basándome en diseños existentes, considero que proporciona una de las mejores estructuras aerodinámicas consiguiendo una velocidad superior a otros.

### 5.3.1. Estructuras mecánicas estudiadas

- Dimensionamiento de las alas delanteras: para la construcción del prototipo se comenzó con el dimensionamiento de las alas delanteras. Se probaron varias opciones con sus consiguientes datos aerodinámicos. Después de varias pruebas, se decide utilizar el diseño que se visualiza en la imagen inferior, se elige este debido a la obtención de su perfil aerodinámico mostrado a continuación, el cual, según varios estudios es considerado el ideal para aeronaves de este tipo.

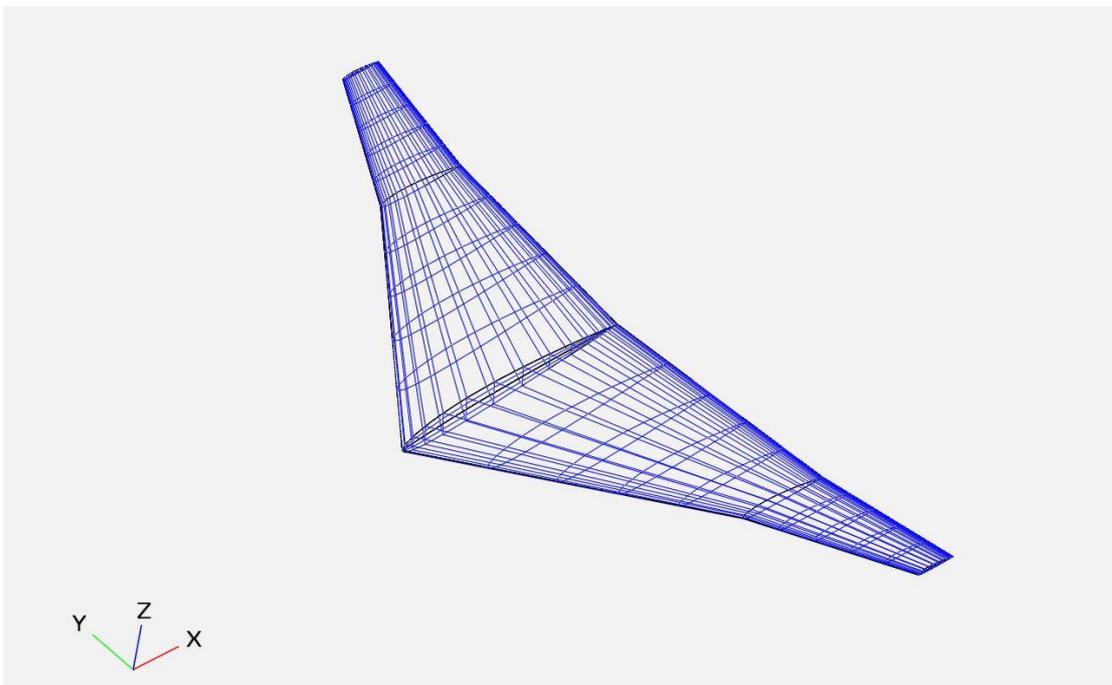


Figura 5.11.- Dimensionamiento alas delanteras, elaboración propia

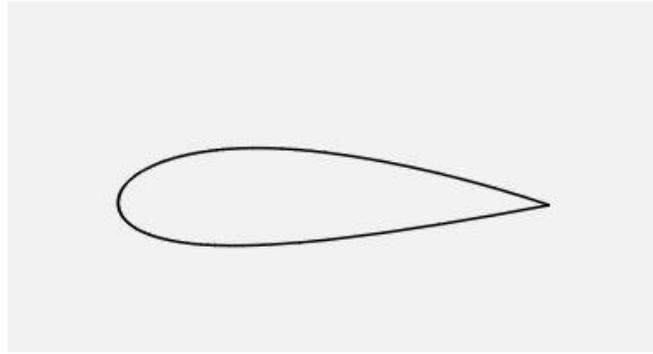


Figura 5.12.- Perfil aerodinámico alas delanteras, elaboración propia

- Dimensionamiento de las alas traseras: para este diseño, se utiliza un ala girada  $25^\circ$  para conseguir la aerodinámica deseada. Se basa en el modelo de Joby Aviation, considerando su diseño uno de los mejores a día de hoy.

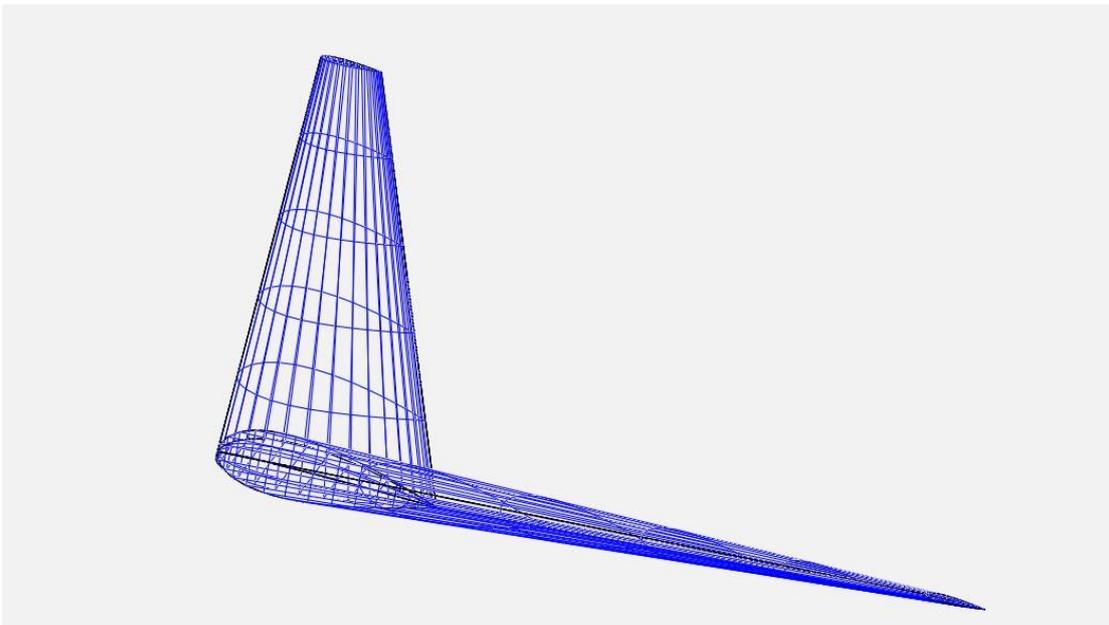


Figura 5.13.- Dimensionamiento ala trasera, elaboración propia

- Dimensionamiento del fuselaje: para esta parte del diseño, se divide el mismo en cuatro zonas diferentes para la correcta división de su diámetro. De esta manera, en la parte delantera del mismo se aumenta el tamaño (cabina) cerrando la punta por razones obvias. A medida que nos dirigimos a la cola del eVTOL, el diámetro

progresivamente mengua. Para el diseño del mismo, se considera la densidad de la fibra de carbono.

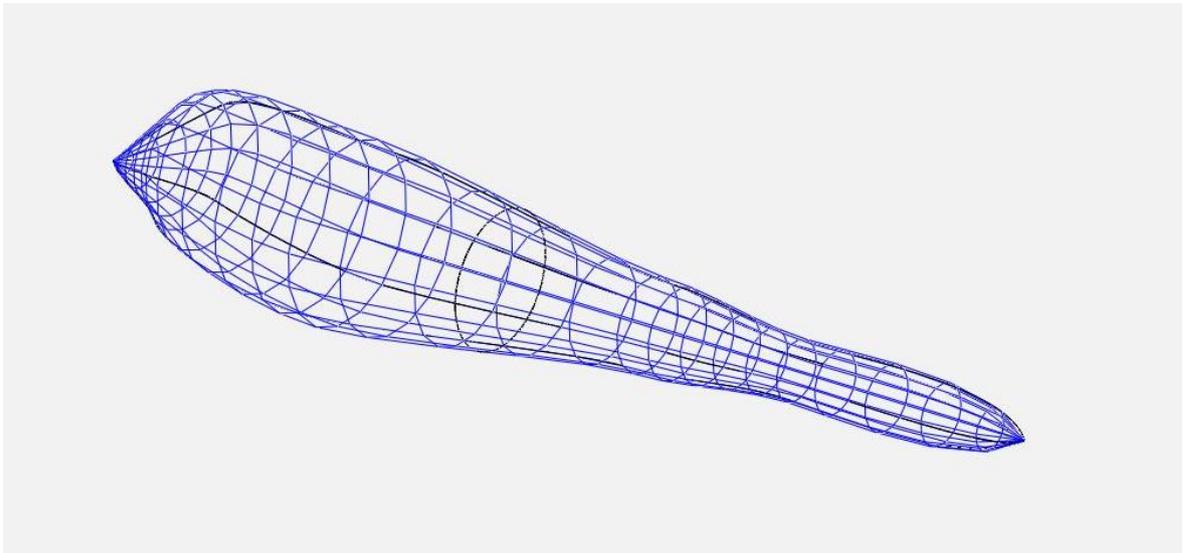


Figura 5.14.- Dimensionamiento del fuselaje, elaboración propia

- Dimensionamiento de las hélices: por último, para el diseño de las hélices se comparan varios modelos de pala hasta conseguir el siguiente

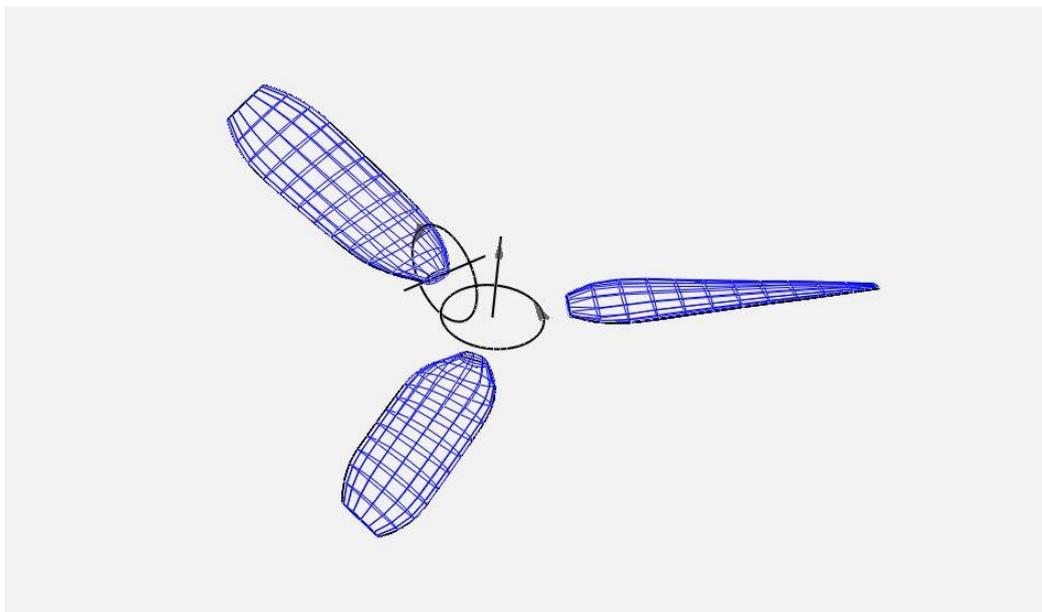


Figura 5.15.- Dimensionamiento de las hélices, elaboración propia

### 5.3.2. Estructura mecánica final

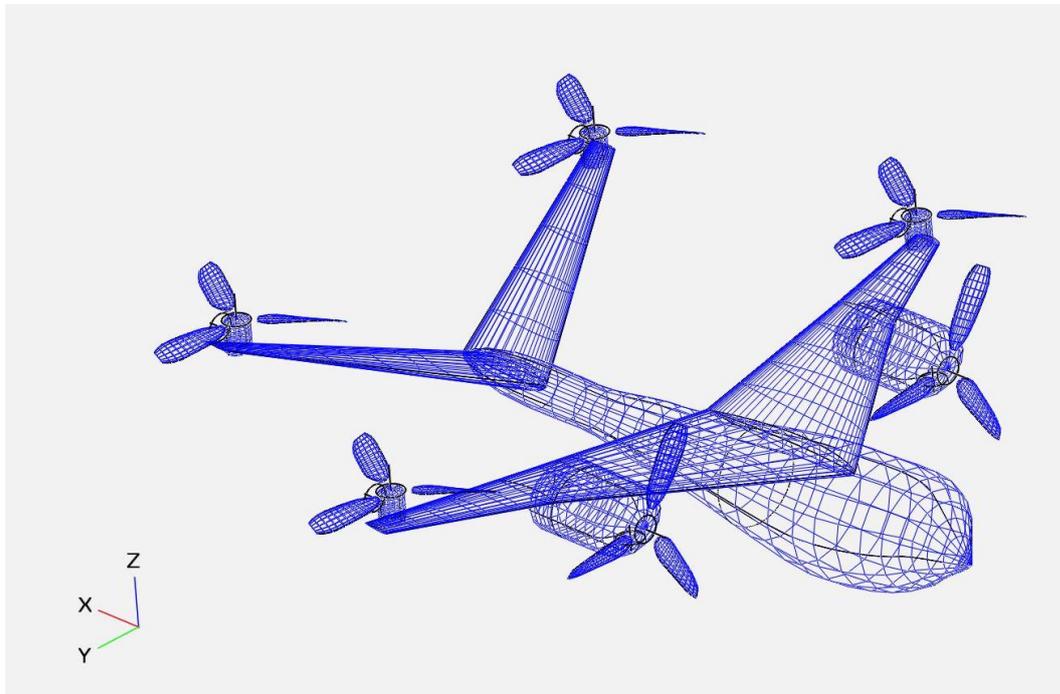


Figura 5.16.- Agrupación de diseño de eVTOL, elaboración propia

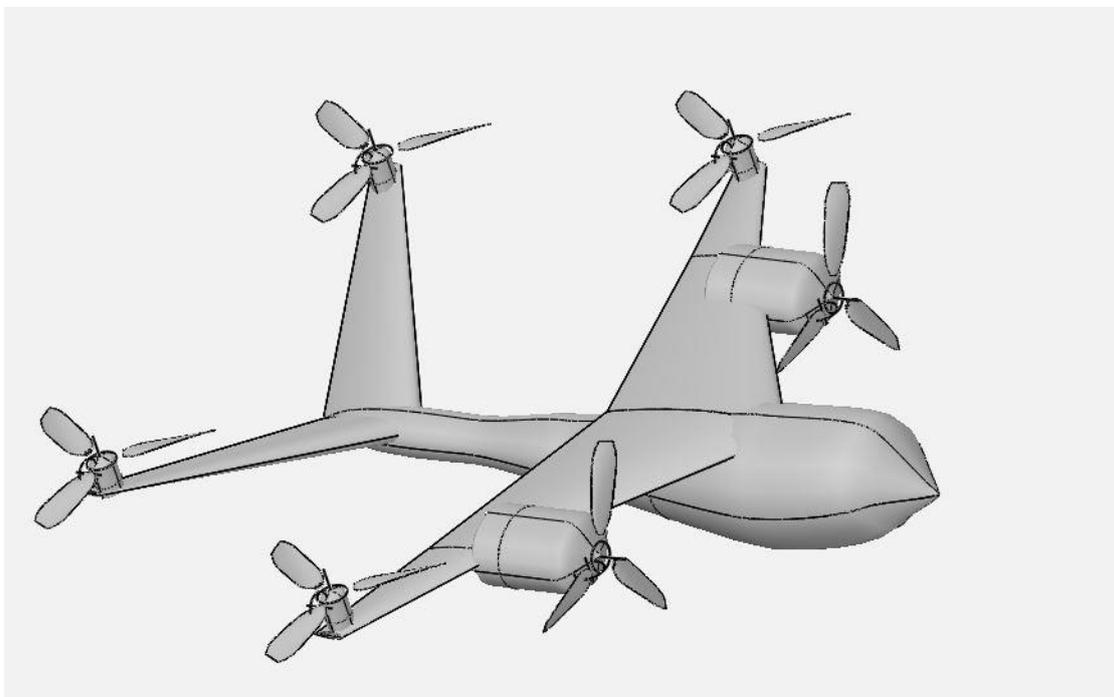


Figura 5.17.- Diseño final eVTOL, elaboración propia

## 6. ESTUDIO ECONÓMICO Y DE MERCADO

Para el desarrollo de un estudio económico y de mercado en un área tan amplia como la presente, debemos centrarnos en diferentes aspectos: coste de diseño y producción de la aeronave y coste de la nueva construcción o rehabilitación de edificios que puedan soportar la infraestructura necesaria.

Debido a estas razones, el estudio se va a centrar en dos variables conocidas:

- Construcción y desarrollo de eVTOL basado en diferentes tipos de propulsión para su comparación económica
- Rehabilitación de un edificio en el centro de Madrid

### 6.1. Estudio económico de desarrollo aeronave eVTOL

Para un correcto desarrollo del estudio de mercado, es necesario realizar una comparativa de precio y eficacia entre aeronaves dependiendo de su tecnología técnica, de propulsión y modo de autonomía.

Según todos los estudios económicos realizados por partes independientes, se espera un crecimiento en el mercado de aeronaves eVTOL de un 30.3% anualmente, consiguiendo una valoración de mercado de 4063.3 millones de dólares en el año 2030.

Como comentábamos, podemos dividir la aproximación del estudio de mercado según:

- Tipo de aeronave:
  - o **Taxi aéreo**
  - o Drones de envío de paquetería
  - o eVTOL medicalizado
  - o Transporte publico
- Tipo de batería:
  - o **Baterías de litio**
  - o Pilas de combustible de hidrogeno
- Tipo de tecnología de avance:
  - o **Multirotor**
  - o Empuje vectorial

- Ascenso y crucero
- Tipo de propulsión
  - **Eléctrica**
  - Híbrida
- Modo de autonomía:
  - **Autónomo**
  - Pilotado
  - Semiautónomo

Las diferencias existentes entre todos los tipos de características de un eVTOL han sido comentadas y resueltas a lo largo del desarrollo del proyecto, es por eso por lo que va a ser estudiado un eVTOL orientado al taxi aéreo, con baterías de litio, tecnología multirotor, propulsión eléctrica y completamente autónomo, como es el caso del eVTOL desarrollado por la empresa Joby Aviation.

El estudio está centrado en Europa, concretamente en España, donde, según los estudios, se espera que el mercado alcance los 1141.4 millones de dólares en el año 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) de 30.26%.

Por otro lado, se escoge centrar el estudio en baterías de litio, ya que es la tecnología con mayor CAGR supuesto, del 29.46%, y en el sistema de propulsión eléctrica, valorado en 138 millones de dólares.

Considerando la visión general de mercado estudiada, la empresa Joby Aviation, considera necesaria la aparición de un mercado potencial de **10 billones de dólares**, y para ello es necesario la obtención de un mercado de alrededor de 300 mil millones de dólares en los próximos años.

La cuestión más importante que es necesario resolver para la integración del ciudadano en el uso de este tipo de nueva tecnología es cuánto le va a costar moverse en una aeronave eVTOL, y cuánto va a generar la empresa. Por ello, Joby Aviation, ha publicado un estudio resolviendo estas dudas, de las pocas empresas que ha desvelado esta información:

Tabla 6.1.- Gastos e ingresos derivados por kilómetro y asiento

Generadores de ingresos para la empresa		Factores de costo por aeronave	
<b>Duración promedio de vuelo</b>	40 km	<b>Piloto</b>	21 céntimos
<b>Velocidad de crucero</b>	265 km/h	<b>Mantenimiento (+ mano de obra)</b>	18 céntimos
<b>Número medio de pasajeros</b>	2,3	<b>Costes relacionados con vertiport</b>	10 céntimos
<b>Tiempo de respuesta</b>	6 minutos	<b>Batería y carga</b>	12 céntimos
<b>Precio/milla por asiento</b>	2,8 euros	<b>Avión y seguro</b>	8 céntimos
<b>INGRESOS POR MILLA Y ASIENTO</b>	1,57 dólares	<b>Otros gastos</b>	11 céntimos
		<b>COSTES POR MILLA Y ASIENTO</b>	0,82 céntimos

Considerando los precios publicados por la empresa, muchos expertos comentan que puede haber problemas de aumento de costes a los pasajeros, ya que una aeronave eVTOL de estas características puede llegar a costar entre **1-3 millones de dólares**. Para poder regular los precios para que no sean excesivamente altos, es imprescindible que exista una alta demanda de servicios [74].

Si se analizan los datos obtenidos, por ejemplo, en la realización de un vuelo de 25 kilómetros, y sabiendo que por kilómetro un usuario pagaría 2.8 euros, sería un vuelo de 70 euros de precio, considerando, como en Joby Aviation, una aeronave de 4 asientos, se genera un precio de 280 euros.

A la vista se puede considerar un coste elevado, pero pagar 70 euros por un viaje de 25 kilómetros a la velocidad potencial que pueden tener este tipo de aeronaves, es muy rentable para una alta parte de la población, considerando que por tierra en el mismo trayecto aumentaría la distancia y existen muchos retrasos por el camino.

El mismo recorrido, de aproximadamente 25 kilómetros realizado en UberBlack, tiene un coste aproximado de entre 39 y 51 euros con un tiempo de alrededor de 35 minutos, ejemplo básico en el que se puede observar la ventaja que significa el uso de transporte por aire [75].



A continuación, realizamos una búsqueda de la valoración de bienes urbanos en la Comunidad de Madrid para obtener un precio aproximado del metro cuadrado [77]:

Comunidad de Madrid | Dirección General de Tributos | Consejería de Economía, Hacienda y Empleo  
Sistema Integral de Valoraciones

Inicio > Sistema de Ayuda al Contribuyente

Sistema de Ayuda al Contribuyente para la determinación de Bases Imponibles en los Impuestos sobre Transmisiones Patrimoniales y Actos Jurídicos Documentados. Sucesiones y Donaciones

Consulta de valor unitario aplicable al sector de valoración

Año: 2022  
Provincia: 28 Madrid  
Municipio: 079 Madrid

Dirección	Sector de Valoración	Valor Unitario del Sector para el Tipo de Bien
PLAZA DEL CELENQUE 2	San Martín - Convento Descalzas	Local comercial 4.375,00 €/m2

Volver

Figura 6.3.- Valoración de bienes urbanos en la Comunidad de Madrid

La intención del estudio es apropiarse del edificio completo para construir una sede importante de servicio eVTOL. De esta manera, en las primeras plantas se instalarían ventanillas de información y compra de tickets y control de seguridad, así como locales orientados a la restauración.

En las plantas superiores oficinas de administración asociadas a estas aeronaves y zonas de reparación más exhaustiva de los propios medios de transporte. Por último, en la azotea del edificio, nos encontraríamos con todas las zonas de despegue y aterrizaje, los puestos de carga y puestos de reparación sencilla.

Considerando lo anterior, estamos hablando de un precio total por adquisición del inmueble de **10.753.750,00** millones de euros.

A continuación, se va a aproximar el precio que conllevaría la adquisición e instalación de los elementos necesario en un vertipuerto:

- Cargadores de aeronaves: considerando el tamaño de estación del que disponemos, se va a suponer el acogimiento de hasta 10 eVTOL, siendo necesario un cargador por aeronave (9000 €/cargador), y siendo preferiblemente cargadores rápidos (230000€/cargador), estaríamos hablando de una inversión de **1.195.000,00€** en la compra de 5 cargadores y 5 cargadores rápidos.

- Para la estimación del consumo eléctrico en la carga de estas naves, se considera una autonomía por aeronave de 322 kilómetros, y sabiendo que la duración promedio de viaje son 40 kilómetros, cada eVTOL puede realizar un total de 8 vuelos con una sola carga de batería. Suponiendo, como se estableció anteriormente, que una aeronave realiza de medio al día un total de 20 vuelos, se obtiene un total de 2.5 cargas diarias por aerotaxi, con la necesidad de 150kWh para su carga completa. Sabiendo que el coste medio de la energía eléctrica en la actualidad es de 0.20€/kWh [78], y considerando el tiempo de carga establecido en el apartado 3 de este proyecto, obtenemos un coste anual de energía eléctrica de **273.750,00 €**.

Existen muchos otros factores que serían necesarios tener en cuenta, pero muchos de los datos que nos hacen falta no han sido desvelados por las empresas fabricantes. En este punto nos hemos podido hacer la idea de la inversión necesaria para la puesta en marcha de un proyecto de este nivel.

## 7. CONCLUSIONES

El presente apartado cierra el Trabajo de Fin de Grado, resumiendo las conclusiones obtenidas del estudio y una orientación a líneas futuras.

El objetivo de dicho proyecto era el estudio de todas las áreas que comprende el desarrollo de un prototipo eVTOL para la Movilidad Aérea Urbana, estableciendo las bases necesarias en todos los ámbitos.

Se comenzó estableciendo la historia de las aeronaves, cómo surgieron y las razones por las que es un área de la Ingeniería que debe avanzar, y aún le queda mucho. Nos encontramos en una situación actualmente que requiere medidas drásticas para la mejora del medioambiente, para lo que es imprescindible la búsqueda de alternativas verdes, vehículos no contaminantes, y no solo eso, sino la búsqueda de un medio de transporte que también ahorre en tiempo y en dinero.

A continuación, se estudió la infraestructura necesaria que debe ser diseñada y optimizada, y se dieron soluciones para el aprovechamiento de las estaciones actuales de helicópteros y aviones comerciales. Además, se estudiaron los diferentes tipos de estaciones y su utilidad y aprovechamiento para diferentes áreas de transporte aéreo. Se proponen también, soluciones del orden numérico y económico en este aspecto. Además del dimensionamiento infraestructural, se solucionan y se exponen los diferentes sistemas de propulsión posibles y el diseño de carga y control de las aeronaves de aterrizaje y despegue vertical.

Relacionado con el punto anterior, se comentan los diferentes usos posibles que se le pueden dar a este tipo de medios de transporte, ya sea de movimiento ciudadano, paquetería o rescate ambulatorio, de esta manera pudimos observar la cantidad de beneficios en todos los ámbitos del transporte actual que puede suponer la implementación de este tipo de movilidad aérea. Como es normal en todo proyecto novedoso y aún sin implementar, nos encontramos con numerosos problemas por el camino, destacando, por supuesto, el dimensionamiento de las baterías, dando una solución posible basada en un estudio estadounidense sobre la utilización de baterías de litio acompañadas de una pequeña pestaña de níquel, consiguiendo un mejor rendimiento y una carga completa en menor tiempo, supuesto que se ha utilizado durante el desarrollo de todo el proyecto posterior.

En el presente trabajo se han expuesto también las diferentes empresas desarrolladoras de eVTOL, con sus ventajas y los problemas a solucionar de cada una de ellas, además de los prototipos de última generación desvelados hasta día de hoy, sacando conclusiones de cada uno de ellos y orientando los últimos puntos del proyecto en los particulares casos de las empresas Volocopter y Joby Aviation.

Nos enfrentamos a continuación, a la implementación electrónica y mecánica que hace posible la existencia de naves de este calibre, estudiando los componentes electrónicos más importantes y comentando sus ventajas e inconvenientes, además de su utilización y sus principales características de consumo. Se expuso a continuación, un dimensionamiento de alas básico para el entendimiento a cualquier parte interesada del proceso de ingeniería que existe detrás de todas las empresas desarrolladoras.

Por último, se expuso un control económico y de mercado para la comprensión del capital necesario para la implementación de los eVTOL en una ciudad como Madrid y el imprescindible apoyo ciudadano necesario para su puesta en marcha.

El Trabajo de Fin de Grado al que me he enfrentado por elección propia es muy interesante a la vez que novedoso, sin embargo, por la alta carga de investigación y generalidad de este, no me ha sido posible centrarme demasiado en ningún punto. Podría haber sido interesante reducir la temática del trabajo, y de esta manera poder haber indagado más sobre el dimensionamiento energético o electrónico del mismo.

Las principales limitaciones, y por tanto, las necesidades inminentes a las que se deben hacer frente son, como ya se ha comentado, la investigación en el ámbito energético, debido a que es la razón principal de limitaciones de autonomía y funcionalidad, debido en parte, al aumento de peso de la aeronave. Por otro lado, considero que una limitación existente y muy importante, es la inexistencia de regulación adaptable a este tipo de transporte, ni para su infraestructura terrestre ni, por supuesto, aérea.

Para terminar, considero que es un aérea que está empezando a ser explotada y estudiada, y que, por supuesto, ha llegado para quedarse.

# Lista de referencias bibliográficas

- [1] «Cuánto contamina viajar en avión y qué efectos tiene en el medio ambiente», *Nius Diario*, 20 de noviembre de 2019. [https://www.niusdiario.es/sociedad/medio-ambiente/cuanto-contamina-volar-avion-efectos-medio-ambiente\\_18\\_2854170231.html](https://www.niusdiario.es/sociedad/medio-ambiente/cuanto-contamina-volar-avion-efectos-medio-ambiente_18_2854170231.html) (accedido 2 de marzo de 2022).
- [2] «Urban Air Mobility (UAM)», *EASA*. <https://www.easa.europa.eu/domains/urban-air-mobility-uam> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [3] H. Kinjo, «Development trends and prospects for eVTOL: a new mode of air mobility», p. 8, 2018.
- [4] «Helicopters vs eVTOLs: How will going electric improve aerial mobility?», *TransportUP*, 21 de septiembre de 2019. <https://transportup.com/headlines-breaking-news/helicopters-vs-evtols-how-will-going-electric-improve-aerial-mobility/> (accedido 8 de abril de 2022).
- [5] «Mapas: La urbanización en el mundo entre 1950 y 2030, Plataforma Urbana». <https://www.plataformaurbana.cl/archive/2015/02/16/mapas-la-urbanizacion-en-el-mundo-entre-1950-y-2030/> (accedido 20 de junio de 2022).
- [6] «Traffic congestion ranking | TomTom Traffic Index». [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/ranking/](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/) (accedido 9 de abril de 2022).
- [7] «Las peores ciudades para el tráfico de todo el mundo», *La Vanguardia*, 11 de octubre de 2016. <https://www.lavanguardia.com/motor/rankings/20161012/41926076097/las-ciudades-con-peor-trafico-del-mundo.html> (accedido 8 de abril de 2022).
- [8] «La pandemia cambió las ciudades con más tráfico del mundo | Memo Lira». <https://memolira.com/noticias/ciudades-con-mas-trafico-del-mundo/> (accedido 20 de junio de 2022).
- [9] «Las ciudades con más tráfico del mundo en 2020», *La Vanguardia*, 20 de enero de 2021. <https://www.lavanguardia.com/motor/rankings/20210120/6185241/ciudades-mas-congestion-trafico-mundo-2020.html> (accedido 8 de abril de 2022).
- [10] «Las ciudades españolas con más y menos tráfico en 2020 (hay sorpresas) | Marca.com». <https://www.marca.com/coches-y-motos/trafico/2021/01/31/601553caca474191458b456e.html> (accedido 8 de abril de 2022).
- [11] «Las 25 ciudades que más atascos sufren en España | Motor EL PAÍS». <https://motor.elpais.com/actualidad/25-ciudades-atascos-espana/> (accedido 20 de junio de 2022).
- [12] «No cierres los ojos ante la contaminación del transporte», *Muévete en verde*, 19 de agosto de 2019. <https://www.mueveteenverde.es/cambio-climatico/contaminacion-transporte-movilidad/> (accedido 9 de abril de 2022).
- [13] «Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía) | Noticias | Parlamento Europeo», 22 de marzo de 2019. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia> (accedido 9 de abril de 2022).

- [14] «Vertiport, el puerto de aterrizaje vertical para los taxis voladores que se va a construir en Italia | Motor - ComputerHoy.com». <https://computerhoy.com/noticias/motor/vertiport-puerto-aterrizaje-vertical-taxis-voladores-ehang-833141> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [15] P. K. Mizokami, «Nikola Tesla Patented a Vertical Takeoff Airplane Nearly 100 Years Ago», *Popular Mechanics*, 29 de octubre de 2021. <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a37694393/nikola-tesla-patented-vertical-takeoff-airplane/> (accedido 25 de abril de 2022).
- [16] «VTOL: Historia del vuelo vertical – NeoTeo». <https://www.neoteo.com/vtol-historia-del-vuelo-vertical/> (accedido 25 de abril de 2022).
- [17] «Más aeronaves eléctricas (MEA): potencia de aeronaves de próxima generación». <https://moreelectricaircraft.com/> (accedido 26 de abril de 2022).
- [18] «Aeronaves totalmente eléctricas (AEA): sistemas eléctricos de propulsión y potencia de aeronaves». <https://allelectricaircraft.com/> (accedido 26 de abril de 2022).
- [19] «What are fly-by-wire systems?», *BAE Systems | United States*. <https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-are-fly-by-wire-systems> (accedido 26 de abril de 2022).
- [20] H. y Eléctricos, «Un avión eléctrico diferente: el proyecto aEro presenta un eVTOL de ala basculante», *Híbridos y Eléctricos*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/avion-electrico-diferente-proyecto-aero-evtol-ala-basculante/20210701211012046605.html> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [21] J. Golson, «Electric helicopters put us on the precipice of a wild new revolution», *Inverse*. <https://www.inverse.com/innovation/flying-cars-are-already-here> (accedido 26 de abril de 2022).
- [22] «Fig. 4 Revolutionary Vertical Lift Technology (RVLT) common reference...», *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/Revolutionary-Vertical-Lift-Technology-RVLT-common-reference-models-CRM-clockwise\\_fig2\\_342020719](https://www.researchgate.net/figure/Revolutionary-Vertical-Lift-Technology-RVLT-common-reference-models-CRM-clockwise_fig2_342020719) (accedido 29 de abril de 2022).
- [23] «(62) eVTOL - Aeronaves Eléctricas de Despegue y Aterrizaje Vertical | LinkedIn». <https://www.linkedin.com/pulse/evtol-aeronaves-el%C3%A9ctricas-de-despegue-y-aterrizaje-pombo-lanza/?originalSubdomain=es> (accedido 6 de mayo de 2022).
- [24] «Noise Comparison of Aerospace Vehicles». [En línea]. Disponible en: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://evtol.news/\\_\\_media/PDFs/3-GOLDMAN-Joby-eVTOLAcoustics-HeliExpo2020.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://evtol.news/__media/PDFs/3-GOLDMAN-Joby-eVTOLAcoustics-HeliExpo2020.pdf)
- [25] «eVTOL y eSTOL (despegue y aterrizaje eléctricos) – Airtradeworld». <https://airtradeworld.com/evtol-y-estol-despegue-y-aterrizaje-electricos/> (accedido 6 de mayo de 2022).
- [26] «Mobilidade Aérea Urbana - Diferenças Entre eVTOL, eSTOL e eCTOL -», *Flapper - Your New First Class*, 30 de marzo de 2022. <https://www.flyflapper.com/stories/pt-br/mobilidade-aerea-urbana-diferencas-entre-evtol-estol-e-ectol/> (accedido 6 de mayo de 2022).
- [27] «Infrastructure barriers to the elevated future of mobility». [En línea]. Disponible en: <chrome->

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/5103\_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM/DI\_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM.pdf
- [28] «CONOPS: La base de la regulación de los UAVs en su propio uso», *Embention*, 29 de octubre de 2021. <https://www.embention.com/es/news/conops-regula-operaciones-uavs/> (accedido 9 de mayo de 2022).
- [29] «Dimensionamiento de helipuertos». [En línea]. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icao.int/SAM/Documents/H-SAFETY-EFF/Manual%20de%20Helipuertos\_Doc9261.pdf
- [30] «Volocopter VoloCity». <https://evtol.news/volocopter-volocity> (accedido 15 de mayo de 2022).
- [31] «Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional». [En línea]. Disponible en: <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-14-vol-ii.pdf>
- [32] «Dimensionado de terminales de pasajeros», *AERTEC*, 30 de septiembre de 2018. <https://aertecolutions.com/2018/10/01/dimensionado-de-terminales-de-pasajeros/> (accedido 9 de junio de 2022).
- [33] M. Maza, «Sistema Fly-by-wire, una maravilla tecnológica», *Noticias de Aviación Transponder 1200*, 16 de mayo de 2018. <https://www.transponder1200.com/sistema-fly-by-wire-una-maravilla-tecnologica/> (accedido 10 de junio de 2022).
- [34] «Las aeronaves eVTOL: el transporte del futuro en la Movilidad Aérea», *RPAS Drones*, 21 de septiembre de 2020. <https://www.rpas-drones.com/las-aeronaves-evtol-el-transporte-del-futuro-en-la-movilidad-aerea/> (accedido 10 de junio de 2022).
- [35] «Autopiloto para dron Veronte 1x - UAV Autopilots - Productos Veronte», *Embention*. <https://www.embention.com/es/producto/autopiloto-simple/> (accedido 10 de junio de 2022).
- [36] Infodron, «Embention y Volz unen fuerzas para desarrollar sistemas de control de UAV», *Infodron*. <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/3529200/embention-volz-unen-fuerzas-desarrollar-sistemas-control-uav> (accedido 10 de junio de 2022).
- [37] «LRG\_Machbarkeitsstudie\_engl.pdf». Accedido: 10 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://luftrettung.adac.de/app/uploads/2021/02/LRG\\_Machbarkeitsstudie\\_engl.pdf](https://luftrettung.adac.de/app/uploads/2021/02/LRG_Machbarkeitsstudie_engl.pdf)
- [38] «Hepperle - Electric Flight – Potential and Limitations.pdf». Accedido: 10 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://elib.dlr.de/78726/1/MP-AVT-209-09.pdf>
- [39] «Conoce la batería para aviones eléctricos eVTOL – Aeroiasca». <https://iasca.aero/conoce-la-bateria-para-aviones-electricos-evtol/> (accedido 10 de junio de 2022).
- [40] M. López, «Los eVTOL también necesitarán recargarse, y estos puntos de carga de 1.500 vatios lo podrán hacer en 30 minutos», *Xataka*, 15 de octubre de 2021. <https://www.xataka.com/vehiculos/evtol-tambien-necesitaran-recargarse-estos-puntos-carga-1-500-vatios-podran-hacer-30-minutos> (accedido 10 de junio de 2022).

- [41] P. Pradeep y P. Wei, «Energy-Efficient Arrival with RTA Constraint for Multirotor eVTOL in Urban Air Mobility», *J. Aerosp. Inf. Syst.*, vol. 16, n.º 7, pp. 263-277, 2019, doi: 10.2514/1.I010710.
- [42] «Distributed Embedded Electric Propulsion Control System for eVTOL/UAM Vehicles», *Afwerx Collider*. <https://collider.afwerx.com> (accedido 10 de junio de 2022).
- [43] «Vertiport regulations and standards: Creating the rules framework for UAM infrastructure», *Skyports*, 23 de julio de 2020. <https://skyports.net/2020/07/vertiport-regulations-and-standards-creating-the-rules-framework-for-uam-infrastructure/> (accedido 10 de junio de 2022).
- [44] «URBAN AIR MOBILITY (UAM) MARKET STUDY - PDF Free Download». <https://docplayer.net/162724409-Urban-air-mobility-uam-market-study.html> (accedido 15 de junio de 2022).
- [45] «VoloDrone», *Volocopter*. <https://www.volocopter.com/solutions/volodrone/> (accedido 15 de junio de 2022).
- [46] «Google's Wing drones deliver essentials during coronavirus pandemic», *Dezeen*, 15 de abril de 2020. <https://www.dezeen.com/2020/04/15/google-wing-drone-delivery-coronavirus-virginia/> (accedido 15 de junio de 2022).
- [47] «DHL and EHang Partner on Urban Drone Delivery in China», *DRONELIFE*, 30 de mayo de 2019. <https://dronelife.com/2019/05/30/dhl-and-ehang-partner-on-urban-drone-delivery-in-china/> (accedido 15 de junio de 2022).
- [48] «Vuelo inaugural del dron inteligente EHang Falcon para reparto urbano - Manutención y Almacenaje». <https://www.manutencionyalmacenaje.com/articulos/245813-Vuelo-inaugural-del-dron-inteligente-EHang-Falcon-para-reparto-urbano.html> (accedido 20 de junio de 2022).
- [49] «es.pdf». Accedido: 15 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/downloads/9799/es>
- [50] «Atascos en Madrid: estos son los 15 puntos negros de tráfico que hay que evitar», *El Independiente*, 14 de marzo de 2018. <https://www.elindependiente.com/economia/2018/03/14/atascos-madrid-estos-son-15-puntos-negros-trafico-evitar/> (accedido 16 de junio de 2022).
- [51] «El tiempo perdido al año en los atascos equivale a una semana de vacaciones». <https://www.20minutos.es/noticia/756579/0/tiempo/perdido/atascos/> (accedido 16 de junio de 2022).
- [52] E. Feldhoff y G. Soares Roque, «Determining infrastructure requirements for an air taxi service at Cologne Bonn Airport», *CEAS Aeronaut. J.*, vol. 12, n.º 4, pp. 821-833, nov. 2021, doi: 10.1007/s13272-021-00544-4.
- [53] «Electric Vertical HEMS: A New Era in Air Ambulance?». <https://evtol.news/news/electric-vertical-hems-a-new-era-in-air-ambulance> (accedido 16 de junio de 2022).
- [54] «ADAC Demos Volocopter eVTOL In Air Medical Rescue | Aviation Week Network». <https://aviationweek.com/defense-space/adac-demos-volocopter-evtol-air-medical-rescue> (accedido 20 de junio de 2022).

- [55] «Advanced Air Mobility: Opportunities and Challenges Deploying eVTOLs for Air Ambulance Service». [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1183/pdf?version=1647421043>
- [56] P. A. R. Ochoa, «Lilium Jet: el taxi volador para cinco pasajeros despegó hacia 2025», *Car and Driver*, 18 de mayo de 2019. <http://www.caranddriver.es/estilo-de-vida/a60086/lilium-jet/> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [57] «Lilium Jet - The First Electric VTOL (eVTOL) Jet - Lilium». <https://lilium.com/jet> (accedido 16 de junio de 2022).
- [58] «Why the Lilium 7-Seater Design Architecture Favors Cruise Flight Over VTOL Capabilities - Aviation Today». <https://www.aviationtoday.com/2021/04/19/lilium-7-seater-design-architecture-favors-cruise-flight-vtol-capabilities/> (accedido 20 de junio de 2022).
- [59] «Joby S4». <https://evtol.news/joby-s4> (accedido 16 de junio de 2022).
- [60] «EHang 216». <https://evtol.news/ehang-216> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [61] «EHang | UAM - Passenger Autonomous Aerial Vehicle (AAV)». <https://www.ehang.com/ehangaav> (accedido 16 de junio de 2022).
- [62] «Volocopter VoloDrone». <https://evtol.news/volocopter-volodrone> (accedido 16 de junio de 2022).
- [63] «Volocopter VoloConnect». <https://evtol.news/volocopter-voloconnect> (accedido 16 de junio de 2022).
- [64] «La revolución eVtol | elsecretodelospajaros». <https://elsecretodelospajaros.net/2020/08/16/la-revolucion-evtol/> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [65] «El motor/controlador MAGiCALL compite por la simplicidad y la ligereza > Cielos sostenibles», 10 de febrero de 2018. <https://sustainableskies.org/magicall-motorcontroller-vies-simplicity-lightness/> (accedido 17 de junio de 2022).
- [66] «magidrive-datasheet.pdf». Accedido: 17 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.magicall.biz/downloads/magidrive-datasheet.pdf>
- [67] «Medium Altitude Long Endurance - an overview | ScienceDirect Topics». <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/medium-altitude-long-endurance> (accedido 18 de junio de 2022).
- [68] «Professional Autopilot 4x - Products Veronte Embention», *Embention*. <https://www.embention.com/product/professional-autopilot-4x/> (accedido 18 de junio de 2022).
- [69] «Datasheet-veronte-4x-opt.pdf». Accedido: 18 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.embention.com/wp-content/uploads/2021/05/Datasheet-veronte-4x-opt.pdf>
- [70] «Especificaciones técnicas Veronte 4x». [En línea]. Disponible en: <https://www.embention.com/wp-content/uploads/2019/01/4xVeronte-autopilot-hum.pdf>

- [71] «Certificación eVTOL Veronte MC24 - Productos Veronte Embention», *Embention*. <https://www.embention.com/es/producto/certificacion-evtol-mc24/> (accedido 18 de junio de 2022).
- [72] «Certificación eVTOL Veronte MC24 - Productos Veronte Embention», *Embention*. <https://www.embention.com/es/producto/certificacion-evtol-mc24/> (accedido 20 de junio de 2022).
- [73] «Especificaciones técnicas Veronte MC24». [En línea]. Disponible en: [https://manuals.embention.com/Veronte\\_MC24/en/latest/pdf/Veronte\\_MC24-en-latest.pdf](https://manuals.embention.com/Veronte_MC24/en/latest/pdf/Veronte_MC24-en-latest.pdf)
- [74] «How Much Will It Cost to Fly on eVTOL Air Taxis?», *FLYING Magazine*, 22 de octubre de 2021. <https://www.flyingmag.com/evtol-air-taxi-passenger-prices/> (accedido 19 de junio de 2022).
- [75] «Tarifa de Taxi Uber de Madrid a La Moraleja». <http://ubertarifa.com/route/5x4r> (accedido 19 de junio de 2022).
- [76] «Sede Electrónica del Catastro - Fondo mapa de España». <https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?buscar=S> (accedido 19 de junio de 2022).
- [77] «madrid.org - Comunidad de Madrid». [https://gestionamadrid.org/siva\\_internet/html/web/ConsultarAyudaContribuyente.icm](https://gestionamadrid.org/siva_internet/html/web/ConsultarAyudaContribuyente.icm) (accedido 19 de junio de 2022).
- [78] «Precio kWh hoy: precio de la luz hora a hora en España», *Selectra*. <https://selectra.es/energia/info/que-es/precio-kwh> (accedido 19 de junio de 2022).
- [79] «Certificación UAV Autopiloto Veronte DO-178 ED-12 y DO-254», *Embention*, 26 de junio de 2015. <https://www.embention.com/es/news/certificacion-uav-autopiloto/> (accedido 20 de junio de 2022).
- [80] «Requisitos legales para la certificación de aeronaves (I)», *Requisitos legales para la certificación de aeronaves (I)*. <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/12/requisitos-legales-para-la.html> (accedido 17 de junio de 2022).

# ANEXOS

## Anexo I

### Anexo 14, Volumen II ICAO: Área de Aproximación Final y de Despegue (FATO)

1. Los helipuertos de superficie tendrán como mínimo un área de aproximación final y de despegue (FATO).

Nota.— La FATO puede estar emplazada en una franja de pista o de calle de rodaje, o en sus cercanías.

2. La FATO estará despejada de obstáculos.
3. Las dimensiones de la FATO serán:
  - a. cuando se destine a helicópteros que operen en la Clase de performance 1, las prescritas en el manual de vuelo del helicóptero (HFM), excepto que, a falta de especificaciones sobre la anchura, ésta no será inferior a la mayor dimensión (D) total del helicóptero más grande para el cual esté prevista la FATO;
  - b. cuando se destine a helicópteros que operen en las Clases de performance 2 ó 3, de tamaño y forma suficientes que contengan un área dentro de la cual pueda trazarse un círculo de diámetro no menor que:
    - i. 1 D del helicóptero más grande, cuando la masa máxima de despegue (MTOM) de los helicópteros para los cuales esté prevista la FATO sea superior a 3 175 kg;
    - ii. 0,83 D del helicóptero más grande cuando la MTOM de los helicópteros para los cuales esté prevista la FATO sea 3 175 kg o menor.

Nota.— En el HFM no se usa la expresión FATO. Se necesita el área mínima de aterrizaje/despegue especificada en el HFM para el perfil de vuelo apropiado de Clase de performance 1 a fin de determinar la dimensión de la FATO. Sin embargo, para los procedimientos de despegue vertical en la Clase de performance 1, normalmente no se cita en el HFM el área de despegue interrumpido y será necesario obtener información que incluya la contención completa: esta cifra siempre será mayor que 1 D.

4. Recomendación.— Cuando se destine la FATO a helicópteros que operen en las Clases de performance 2 ó 3 con una MTOM de 3 175 kg o menos, debería tener el tamaño y forma suficientes como para contener un área dentro de la cual pueda trazarse un círculo de diámetro no menor que 1 D.

Nota.— Es posible que hayan de tenerse en cuenta las condiciones locales, tales como elevación y temperatura, al determinar las dimensiones de una FATO. Véase orientación al respecto en el Manual de helipuertos (Doc 9261).

5. La FATO proporcionará drenaje rápido, pero la pendiente media en cualquier dirección no excederá del 3%. En ninguna parte de la FATO la pendiente local excederá de:
  - a. 5% en helipuertos previstos para helicópteros que operen en la Clase de performance 1; y
  - b. 7% en helipuertos previstos para helicópteros que operen en las Clases de performance 2 ó 3.
6. La superficie de la FATO:
  - a. será resistente a los efectos de la corriente descendente del rotor;
  - b. estará libre de irregularidades que puedan afectar adversamente el despegue o el aterrizaje de los helicópteros; y
  - c. tendrá resistencia suficiente para permitir el despegue interrumpido de helicópteros que operen en la Clase de performance 1.
7. Cuando la FATO esté alrededor del área de toma de contacto y de elevación inicial (TLOF) para helicópteros que operen en las Clases de performance 2 ó 3, la superficie de la FATO será resistente a cargas estáticas.
8. Recomendación.— En la FATO debería preverse el efecto de suelo.
9. Recomendación.— La FATO debería emplazarse de modo de minimizar la influencia del medio circundante, incluyendo la turbulencia, que podría tener impacto adverso en las operaciones de helicópteros.

Nota.— En el Manual de helipuertos (Doc 9261) se brinda orientación sobre la determinación de la influencia de la turbulencia. Si se justifican las medidas de diseño para mitigar la turbulencia pero no resultan prácticas, puede ser necesario considerar limitaciones operacionales en ciertas condiciones de viento [31].

## Anexo II

### Anexo 14, Volumen II ICAO: Área de toma de contacto y elevación inicial (TLOF)

1. En los helipuertos se proporcionará por lo menos una TLOF.
2. Una TLOF estará emplazada dentro de la FATO, o una o más TLOF estarán emplazadas junto con los puestos de estacionamiento de helicópteros. Para las FATO de tipo pista de aterrizaje, son aceptables TLOF adicionales emplazadas en la FATO.  
Nota.— Para más orientación, véase el Manual de helipuertos (Doc 9261).
3. La TLOF será de tal extensión que comprenda un círculo cuyo diámetro sea por lo menos  $0,83 D$  del helicóptero más grande para el cual esté prevista el área.  
Nota.— La TLOF puede tener cualquier forma.
4. Las pendientes, de la TLOF serán suficientes para impedir la acumulación de agua en la superficie, pero no excederán del 2% en ninguna dirección.
5. Cuando esté dentro de la FATO, la TLOF será resistente a cargas dinámicas.
6. Cuando se emplace junto con un puesto de estacionamiento de helicópteros, la TLOF será resistente a cargas estáticas y el tráfico de los helicópteros para los cuales esté prevista.
7. Cuando una TLOF esté emplazada dentro de una FATO que pueda contener un círculo de diámetro mayor que  $1 D$ , su centro se localizará a no menos de  $0,5 D$  del borde de la FATO [31].

## Anexo III

### Anexo 14, Volumen II ICAO: Área de seguridad operacional

1. La FATO estará circundada por un área de seguridad operacional que no necesita ser sólida.
2. El área de seguridad operacional que circunde una FATO se extenderá hacia afuera de la periferia de la FATO hasta una distancia de por lo menos 3 m o 0,25 D, lo que resulte mayor, del helicóptero más grande para el cual esté prevista la FATO, y:
  - a. cada lado externo del área de seguridad operacional será de por lo menos 2 D cuando la FATO sea un cuadrilátero; o
  - b. el diámetro exterior del área de seguridad operacional será de por lo menos 2 D cuando la FATO sea circular.
3. Habrá una pendiente lateral protegida que se eleve a 45° desde el borde del área de seguridad hasta una distancia de 10 m, cuya superficie no penetrarán los obstáculos, salvo que cuando estén de un solo lado de la FATO, se permitirá que penetren en la pendiente lateral.
4. No se permitirá ningún objeto fijo por encima del plano de la FATO en el área de seguridad operacional, excepto los objetos de montaje frangibles que, por su función, deban estar emplazados en el área. No se permitirá ningún objeto móvil en el área de seguridad operacional durante las operaciones de los helicópteros.
5. Los objetos cuya función requiera que estén emplazados en el área de seguridad operacional:
  - a. si están emplazados a una distancia inferior a 0,75 D del centro de la FATO, no sobresaldrán de un plano a una altura de 5 cm por encima del plano de la FATO; y
  - b. si están emplazados a una distancia de 0,75 D o más del centro de la FATO, no sobresaldrán de un plano cuyo origen esté a una altura de 25 cm por encima del plano de la FATO y cuya pendiente ascendente y hacia fuera sea del 5%. 3.
6. Cuando sea sólida, la superficie del área de seguridad operacional no tendrá ninguna pendiente ascendente que exceda del 4% hacia afuera del borde de la FATO.
7. Cuando sea pertinente, la superficie del área de seguridad operacional será objeto de un tratamiento para evitar que la corriente descendente del rotor levante detritos.

8. Cuando sea sólida, la superficie del área de seguridad operacional lindante con la FATO será continuación de la misma [31].

## Anexo IV

### Anexo 14, Volumen II ICAO: Puesto de estacionamiento de helicópteros

Nota.— Las disposiciones de esta sección no especifican el emplazamiento de los puestos de estacionamiento de helicópteros pero permiten un alto grado de flexibilidad en el diseño general del helipuerto. No obstante, no se considera buena práctica emplazar puestos de estacionamiento de helicópteros debajo de una trayectoria de vuelo. Para más orientación véase el Manual de helipuertos (*Doc 9261*).

1. Cuando una TLOF esté emplazada junto con un puesto de estacionamiento de helicópteros, el área de protección de dicho puesto no se superpondrá al área de protección de ningún otro puesto de estacionamiento de helicópteros o ruta de rodaje conexas.
2. El puesto de estacionamiento de helicópteros proporcionará drenaje rápido, pero la pendiente en cualquier dirección no excederá del 2%.

Nota.— Los requisitos relativos a las dimensiones de los puestos de estacionamiento de helicópteros suponen que el helicóptero efectuará virajes estacionarios cuando opere sobre el puesto.

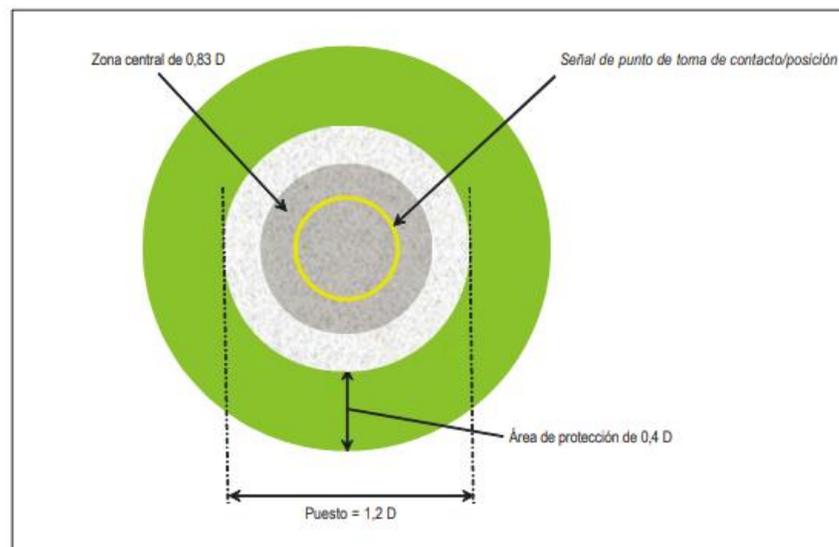


Figura 3-4. Puesto de estacionamiento de helicópteros y zona de protección conexas

Figura IV.1.- Estacionamiento de helicópteros y zona de protección

3. La dimensión de un puesto de estacionamiento de helicópteros destinado a utilización para virajes estacionarios será tal que pueda contener un círculo cuyo diámetro sea por lo menos  $1,2 D$  del helicóptero más grande para el cual esté previsto el puesto. (Véase la Figura 3-4).
4. Cuando se prevea utilizar un puesto de estacionamiento de helicópteros para el rodaje y cuando no se requiera que el helicóptero que la utilice efectúe virajes, la anchura mínima del puesto y área de protección conexa será igual a la de la ruta de rodaje.
5. Cuando se prevea utilizar un puesto de estacionamiento de helicópteros para maniobras de viraje, su dimensión mínima con el área de protección no será menor de  $2 D$ .
6. Cuando se prevea que se utilicen para virajes, los puestos de estacionamiento de helicópteros estarán rodeados por un área de protección que se extenderá una distancia de  $0,4 D$  desde su borde.
7. Para operaciones simultáneas, las áreas de protección de los puestos de estacionamiento de helicópteros y sus rutas de rodaje conexas no se superpondrán. (Véase la Figura 3-5).  
Nota.— Donde se prevean operaciones no simultáneas, las áreas de protección de los puestos de estacionamiento de helicópteros y sus rutas de rodaje conexas pueden superponerse. (Véase la Figura 3-6).
8. En los puestos de estacionamiento de helicópteros y en el área de protección conexa previstos para usarse en el rodaje aéreo se proveerá el efecto de suelo.
9. No se permitirá ningún objeto fijo por encima de la superficie del suelo en el puesto de estacionamiento de helicópteros.
10. No se permitirá ningún objeto fijo por encima de la superficie del suelo en el área de protección alrededor de un puesto de estacionamiento de helicópteros, excepto los objetos frangibles que, por su función, deban situarse ahí.
11. No se permitirá ningún objeto móvil en el puesto de estacionamiento de helicópteros ni en el área de protección conexa durante movimientos de helicópteros.
12. Los objetos cuya función requiera que estén emplazados en el área de protección:
  - a. si están emplazados a una distancia inferior a  $0,75 D$  del centro del puesto de estacionamiento de helicópteros, no sobresaldrán de un plano a una altura de  $5 \text{ cm}$  por encima del plano de la zona central; y

- b. si están emplazados a una distancia de  $0,75 D$  o más del centro del puesto de estacionamiento de helicópteros, no sobresaldrán de un plano a una altura de 25 cm por encima del plano de la zona central y cuya pendiente ascendente y hacia fuera sea del 5%. 3.

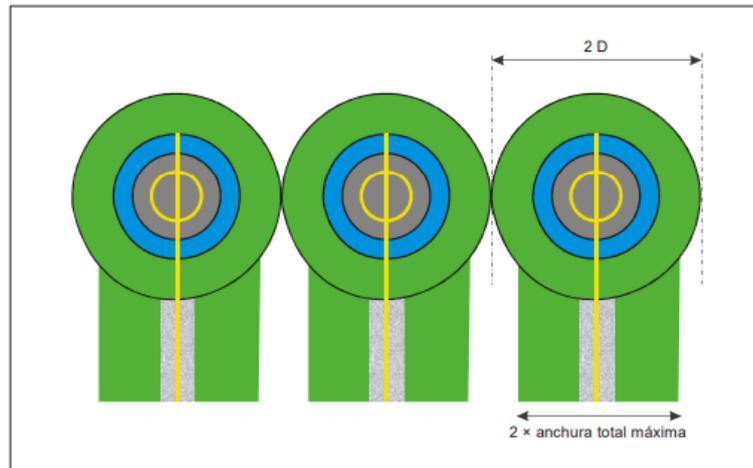


Figura 3-5. Puestos de estacionamiento de helicópteros diseñados para virajes estacionarios en rutas/calles de rodaje aéreo — operaciones simultáneas

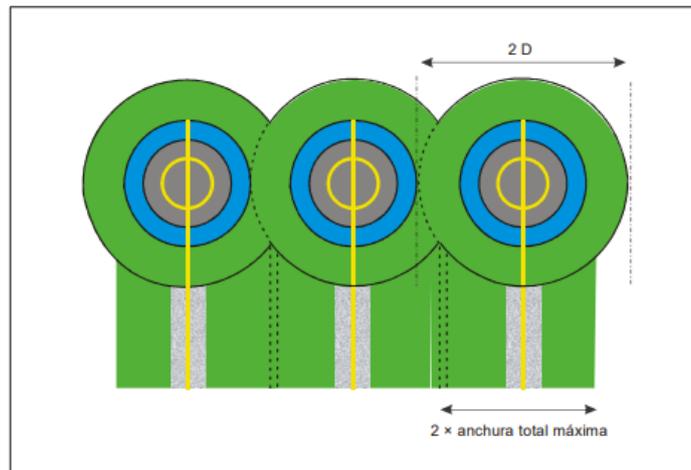


Figura 3-6. Puestos de estacionamiento de helicópteros diseñados para virajes estacionarios en rutas/calles de rodaje aéreo — operaciones no simultáneas

#### Figura IV.2.- Puestos de estacionamiento de helicópteros

13. La zona central de un puesto de estacionamiento de helicópteros será capaz de soportar el tránsito de helicópteros para los que esté prevista y tendrá un área resistente a cargas estáticas:
- de diámetro no menor que  $0,83 D$  del helicóptero más grande para el que esté prevista; o

- b. en un puesto de estacionamiento de helicópteros que se prevea usar para rodaje, y cuando no se requiera que el helicóptero que lo utilice realice virajes, de la misma anchura que la calle de rodaje en tierra para helicópteros.

Nota.— En un puesto de estacionamiento de helicópteros previsto para usarse en virajes en tierra por helicópteros con ruedas, sería necesario aumentar considerablemente la dimensión del puesto de estacionamiento incluida la dimensión de la zona central. Para más orientación véase el Manual de helipuertos (Doc 9261).

## Anexo V

### Anexo 14, Volumen II ICAO: Superficie de aproximación

1. Descripción. Plano inclinado o combinación de planos o, cuando haya virajes involucrados, una superficie compleja de pendiente ascendente a partir del extremo del área de seguridad operacional y con centro en una línea que pasa por el centro de la FATO.
2. Características. Los límites de la superficie de aproximación serán:
  - a. un borde interior horizontal y de longitud igual a la anchura/diámetro mínimo especificado de la FATO más el área de seguridad operacional, perpendicular al eje de la superficie de aproximación y emplazado en el borde exterior del área de seguridad operacional;
  - b. dos lados que parten de los extremos del borde interior y divergen uniformemente en una proporción especificada a partir del plano vertical que contiene el eje de la FATO; y
  - c. un borde exterior horizontal y perpendicular al eje de la superficie de aproximación y a una altura especificada de 152 m (500 ft) por encima de la elevación de la FATO.
3. La elevación del borde interior será la elevación de la FATO en el punto del borde interior que sea el de intersección con el eje de la superficie de aproximación. Para helipuertos destinados a ser utilizados por helicópteros que operan en la Clase de performance 1, y cuando lo apruebe la autoridad competente, el origen del plano inclinado puede elevarse directamente por encima de la FATO.
4. La pendiente de la superficie de aproximación se medirá en el plano vertical que contenga el eje de la superficie.

5. En el caso de una superficie de aproximación que involucre virajes, ésta será una superficie compleja que contiene la perpendicular horizontal a su eje y la pendiente del eje será la misma que la de una superficie de aproximación en línea recta.
6. En el caso de una superficie de aproximación que involucre virajes, la superficie no contendrá más de una parte en curva.
7. Cuando se proporcione una parte en curva de una superficie de aproximación, la suma del radio del arco que define el eje de la superficie de aproximación y la longitud de la parte rectilínea con origen en el borde interior no será inferior a 575m.
8. Toda variación en la dirección del eje de una superficie de aproximación se diseñará de modo que no sea necesario un radio de viraje inferior a 270 m.

Nota.— En los helipuertos previstos para helicópteros que operen en las Clases de performance 2 y 3, constituye una buena práctica seleccionar las trayectorias de aproximación de modo que sean posibles, en condiciones de seguridad, el aterrizaje forzoso o los aterrizajes con un motor fuera de funcionamiento a fin de que, como requisito mínimo, se eviten las lesiones a las personas en tierra o en el agua o daños materiales. El tipo de helicóptero más crítico para el cual se ha previsto el helipuerto y las condiciones ambientales podrían ser factores para determinar la conveniencia de esas zonas [31].

## Anexo VI

### Anexo 14, Volumen II ICAO: Superficie de transición

Nota.— Para una FATO en helipuertos sin aproximación PinS que incorpore una superficie de tramo visual (VSS) no es necesario proporcionar superficies de transición.

1. Descripción. Superficie compleja que se extiende a lo largo del borde del área de seguridad operacional y parte del borde de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue, de pendiente ascendente y hacia fuera hasta una altura predeterminada de 45 m (150 ft).
2. Características. Los límites de la superficie de transición serán:
  - a. un borde inferior que comienza en un punto situado en el borde de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue a una altura especificada por encima del borde inferior que se extiende siguiendo el borde de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue hasta el borde interior de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue y desde allí, por toda la longitud del borde del área de seguridad operacional, paralelamente al eje de la FATO; y
  - b. un borde superior situado a una altura especificada por encima del borde inferior.
3. La elevación de un punto en el borde inferior será:
  - a. a lo largo del borde de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue — igual a la elevación de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue en dicho punto; y
  - b. a lo largo del área de seguridad operacional — igual a la elevación del borde interior de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue.

Nota 1.— Si el origen del plano inclinado de la superficie de aproximación/ascenso en el despegue se eleva conforme a lo aprobado por la autoridad competente, la elevación del origen de la superficie de transición se aumentará en consecuencia.

Nota 2.— Como consecuencia de b), la superficie de transición a lo largo del área de seguridad operacional será curva si el perfil de la FATO es curvo, o plana si el perfil es rectilíneo.

4. La pendiente de la superficie de transición se medirá en un plano vertical perpendicular al eje de la FATO [31].

## Anexo VII

### Estándares DO178, DO254: software y hardware embarcado

**DO-178:** (consideraciones de Software en sistemas aerotransportados y certificación de equipos) es una familia de directrices, considerado el estándar de facto para el desarrollo y certificación de software aeroespacial. Son desarrollados por RTCA en colaboración con EUROCAE. Estas normas son el punto de referencia para la certificación de aeronaves por la FAA y la EASA y han desempeñado un papel importante en el desarrollo de nuevas metodologías para el desarrollo y las pruebas de software crítico.

La primera versión de este estándar, fechada en 1981 y llamada DO - 178 sin ninguna letra de sufijo, era más una colección de Buenas Prácticas que estándares reales.

Un nuevo estándar, llamado DO-178A, introduce 3 niveles de criticidad del software, luego se traduce en los 5 niveles llamados niveles de Garantía de diseño de versiones posteriores. En 1992, se lanzó la versión DO - 178B, que también fue la primera aprobada oficialmente un año más tarde por la FAA para el desarrollo de software. En esta versión, se ha hecho especial hincapié en la especificación de los requisitos y el proceso de análisis de los mismos, con el fin de cumplir con los requisitos de desarrollo de software crítico. Finalmente, en el 2011, casi 20 años después, se lanza y aplica el nuevo estándar do-178C. Esta versión, además de aclaraciones y cambios menores en la terminología, introduce las referencias reglamentarias necesarias.

**DO-254:** es un estándar de seguridad utilizado durante el desarrollo de sistemas aerotransportados. El estándar proporciona orientación para hardware electrónico como unidades reemplazables en línea, ensamblajes de placa de circuito, componentes microcodificados personalizados, componentes de tecnología integrada y componentes comerciales listos para usar.

DO-254 designa diferentes niveles de garantía de diseño, o DAL, para varios sistemas de hardware de la aeronave en función de su criticidad de seguridad:

**Nivel A (catastrófico):** La falla de un sistema de hardware de Nivel A causará o contribuirá a una falla catastrófica de la aeronave y provocará un accidente y / o muertes. Un ejemplo de un sistema de hardware de Nivel A es el sistema de control de vuelo.

**Nivel B (peligroso):** La falla de un sistema de hardware de Nivel B causará o contribuirá a una condición de falla peligrosa / severa y potencialmente causará un accidente y / o muertes. Un ejemplo de un sistema de hardware de Nivel B es el sistema de frenos.

**Nivel C (mayor):** La falla de un sistema de hardware de Nivel C causará o contribuirá a una condición de falla mayor y potencialmente causará estrés y / o lesiones. Los ejemplos de sistemas de hardware de Nivel C incluyen varios sistemas de respaldo.

**Nivel D (menor):** La falla de un sistema de hardware de Nivel D causará o contribuirá a una condición de falla menor y potencialmente causará inconvenientes. Un ejemplo de un sistema de hardware de Nivel D es el sistema de navegación terrestre.

**Nivel E (sin efecto):** La falla de un sistema de hardware de Nivel E no tendrá ningún efecto en la aeronave o en la carga de trabajo del piloto. Los sistemas de entretenimiento para pasajeros entran en esta categoría.

Al ser un estándar orientado a procesos, DO-254 propone un flujo de trabajo específico:

**Planificación:** El objetivo es documentar exhaustivamente el proyecto por adelantado, incluida la mayor cantidad de información posible y explicar claramente cómo se cumplirán los requisitos DO-254.

**Captura y validación de requisitos:** Los requisitos están en el centro de DO-254 y todo el proyecto de hardware gira en torno a ellos. Como tal, cada requisito debe estar escrito, preferiblemente utilizando software de gestión de requisitos.

**Diseño conceptual:** El diseño más grande se divide en componentes más pequeños en esta etapa para implementar los requisitos capturados.

**Diseño detallado:** Durante este paso, cada componente descrito durante la etapa anterior se desarrolla de acuerdo con los requisitos capturados.

**Implementación:** Esta etapa es específica de la tecnología. Una ventaja del DO-254 es que permite al fabricante permanecer en un nivel bastante alto al documentar las actividades durante la implementación.

**Transición de producción:** Una vez que el trabajo de diseño y los dispositivos están listos para comenzar una producción de mayor volumen, el diseño se transfiere a la fabricación.

**Validación y verificación:** Este proceso de soporte ocurre durante todo el diseño del hardware, asegurando que los requisitos sean correctos, completos y verificables.

**Gestión de la configuración:** El propósito de la administración de la configuración es ayudar a garantizar que el dispositivo se desarrolle en un entorno estructurado, repetible y controlado.

**Aseguramiento del proceso:** Cada plan de proyecto Do-254 debe ir acompañado de un documento que describa los pasos que se tomarán para garantizar que se cumpla con el plan.

**Enlace de certificación:** Para garantizar el cumplimiento de DO-254 durante el proceso de desarrollo, es importante colaborar con una autoridad de certificación, conocida como enlace de certificación [79].

## Anexo VIII

### Proceso de cálculo del control óptimo multifásico

A continuación se extienden los cálculos necesarios para la consecución del control óptimo multifásico [41].

Nomenclaturas:

Tabla VIII.1.- Nomenclaturas proceso de cálculo de control óptimo multifásico

<b>A</b>	Área del disco del rotor	<b>D</b>	Fuerza de arrastre
<b>e(t)</b>	Tensión instantánea en el motor	<b>F<sub>h</sub></b>	Área equivalente de la placa superior del fuselaje del avión eVTOL
<b>F<sub>x</sub></b>	Área equivalente de la planta frontal de el fuselaje del avión eVTOL	<b>h</b>	Altitud de la aeronave
<b>i(t)</b>	Corriente instantánea a través del motor	<b>J</b>	Índice de rendimiento del control óptimo
<b>m</b>	Masa de la aeronave	<b>P</b>	Potencia
<b>R</b>	Radio del rotor	<b>T</b>	Fuerza de empuje
<b>V</b>	Velocidad aérea real de la aeronave eVTOL	<b>V<sub>h</sub></b>	Componente de la velocidad aerodinámica real a lo largo de la dirección vertical
<b>V<sub>x</sub></b>	Componente de la velocidad aerodinámica real a lo largo de la pista	<b>v<sub>h</sub></b>	Velocidad inducida por el rotor en vuelo estacionario
<b>(v<sub>h</sub>)<sub>e</sub></b>	Sistema de rotor coaxial efectivo velocidad inducida en vuelo estacionario	<b>v<sub>i</sub></b>	Velocidad inducida por el rotor durante el vuelo hacia adelante
<b>x</b>	Distancia de la aeronave a lo largo de la pista desde el destino	<b>α</b>	Ángulo de ataque del sistema aéreo respecto al rotor plano de la trayectoria de la punta del rotor
<b>γ</b>	Ángulo de la trayectoria de vuelo aerodinámico	<b>η</b>	Factor de eficiencia aerodinámica
<b>θ</b>	Ángulo de inclinación punta-plano del rotor	<b>ρ</b>	Densidad del aire
<b>ω<sub>i</sub></b>	Velocidad angular del i-ésimo rotor		

#### 1. Optimización de la trayectoria vertical como problema de control óptimo de múltiples fases:

$$J = \sum_{N=1}^2 \int_{t_0^N}^{t_f^N} L^N(y(t), u(t), t) dt \quad (\text{VIII.1})$$

Restricciones dinámicas de primer orden:

$$\frac{dy(t)}{dt} = f^N(y(t), u(t), t) \quad (\text{VIII.2})$$

Restricciones de trayectoria:

$$C_{min}^N \leq C^N(y(t), u(t), t) \leq C_{max}^N \quad (\text{VIII.3})$$

Límites de control:

$$u_{min}^N \leq u(t) \leq u_{max}^N \quad (\text{VIII.4})$$

Siendo L la función de coste de Lagrange, N la fase de vuelo vertical (N=1 para crucero, N=2 para descenso), y(t) el vector de estado, u(t) el vector de control y C(y(t),u(t),t) las restricciones de trayectoria.

## 2. Modelo de cinemática y dinámica de vuelo:

Modelo de dinámica longitudinal 2D de la aeronave con marco inercial fijo:

$$\frac{dVx}{dt} = \frac{T \sin \theta - D \cos \gamma}{m} \quad (\text{VIII.5})$$

$$\frac{dVh}{dt} = \frac{T \cos \theta - D \sin \gamma - mg}{m} \quad (\text{VIII.6})$$

$$\frac{dx}{dt} = Vx \quad (\text{VIII.7})$$

$$\frac{dh}{dt} = Vh \quad (\text{VIII.8})$$

$$T = \sum_{i=1}^4 (Tarm)_i \quad (\text{VIII.9})$$

Vector de estado, vector de control y relación entre ángulos:

$$y(t) = [x, h, Vx, Vh]^T \quad (\text{VIII.10})$$

$$u(t) = [\theta, T]^T \quad (\text{VIII.11})$$

$$\alpha = \theta + \gamma \quad (\text{VIII.12})$$

Siendo [x, h] el vector de posición en relación con el origen,  $\theta$  el ángulo de cabeceo, T el empuje neto,  $(Tarm)_i$  el empuje neto producido por el enésimo brazo, m la masa, Vh y Vx las componentes vertical y horizontal de la velocidad del aire y g la aceleración debida a la gravedad.

- 3. Modelo de arrastre:** partiendo de la velocidad máxima de la aeronave en tierra, esta opera en régimen de flujo  $M < 0.3$ , por lo que la fuerza de arrastre se basa en la teoría del flujo incomprensible.

Resistencia neta sobre la aeronave siendo  $F$  la superficie plana equivalente al fuselaje y  $C_D=1$ :

$$D = \frac{\rho V^2 C_D F}{2} \quad (\text{VIII.13})$$

Las componentes horizontal y vertical, siendo  $F_x$  y  $F_h$  son el área equivalente de la placa plana frontal y superior del fuselaje.

$$D_x = \frac{\rho V_x^2 C_D F_x}{2} \quad (\text{VIII.14})$$

$$D_h = \frac{\rho V_h^2 C_D F_h}{2} \quad (\text{VIII.15})$$

- 4. Teoría del impulso en Hover,** utilizando la teoría del momento, la velocidad inducida ( $v_h$ ) viene dada:

$$v_h = \sqrt{\frac{T_{rotor}}{2\rho A}} \quad (\text{VIII.16})$$

Siendo  $T_{rotor}$  el empuje producido por el rotor,  $A$  el área del disco del rotor,  $R$  su radio y  $\rho$  la densidad del aire.

- 5. Teoría del impulso en el vuelo hacia adelante,** considerando la velocidad real  $V$ , ángulo de ataque  $\alpha$  entre la corriente de aire y el disco del rotor, la velocidad inducida ( $v_i$ ) es:

$$v_i = \frac{v_h^2}{\sqrt{(V \cos \alpha)^2 + (V \sin \alpha + v_i)^2}} \quad (\text{VIII.17})$$

En vuelo de alcance, el empuje producido por un rotor ideal:

$$T_{rotor} = \frac{P_{rotor}}{V \sin \alpha + v_i} \quad (\text{VIII.18})$$

La pérdida de potencia inducida de un rotor aislado:

$$P_{induced\ rotor} = T_{rotor} v_i \quad (\text{VIII.19})$$

- 6. Interferencia del rotor coaxial en vuelo de avance**, considerando que la nave de estudio tiene 4 brazos que cuentan con dos rotores cada uno girando en sentido contrario.

Suponiendo un empuje igual producido por los rotores, el empuje neto producido por el brazo:

$$T_{arm} = T_{lower} + T_{upper} = 2T_{rotor} \quad (\text{VIII.20})$$

Pérdida de potencia inducida del brazo:

$$P_{arm} = 2P_{induced\ rotor}(1 + x) \quad (\text{VIII.21})$$

Siendo x el factor de interferencia del rotor para el sistema.

### 7. Potencia requerida por el avión eVTOL:

Ecuación de balance de energía para un eVTOL multirotor:

$$\sum_{i=1}^n I_i w_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_{i=1}^n P_i - P_{required} \quad (\text{VIII.22})$$

Siendo  $P_i$  la energía suministrada por en i-ésimo rotor,  $P_{required}$  la potencia instantánea requerida,  $w_i$  la velocidad de rotación del i-ésimo rotor,  $I_i$  el momento de inercia del i-ésimo rotor y n el número de rotores.

Considerando un vuelo cuasi estable, la potencia instantánea requerida es:

$$P_{required} = P_{induced} + P_{parasite} + P_{climb} + P_{profile} \quad (\text{VIII.23})$$

Considerando una aeronave como la estudiada, con rotores de bajo diámetro, la potencia de perfil es despreciable:

$$P_{required} = P_{induced} + P_{parasite} + P_{climb} \quad (\text{VIII.24})$$

Perdida de potencia inducida:

$$P_{required} = \sum_{i=1}^4 (P_{arm_i}) \quad (VIII.25)$$

Potencia necesaria para ascender y propulsar la nave hacia delante:

$$P_{parasite} + P_{climb} = TV \sin \alpha \quad (VIII.26)$$

Potencia instantánea requerida en vuelo de avance:

$$P_{required} = \sum_{i=1}^4 (P_{arm_i}) + TV \sin \alpha \quad (VIII.27)$$

### 8. Índice de rendimiento del control óptimo multifásico

Potencia suministrada por el paquete de baterías del i-ésimo motor ideal:

$$P_i(t) = e_i(t)i_i(t) \quad (VIII.28)$$

Siendo  $e_i(t)$ ,  $i_i(t)$  la tensión y la corriente instantáneas del motor.

Potencia consumida por los motores:

$$P(t) = \sum_{i=1}^8 e_i(t)i_i(t) \quad (VIII.29)$$

Para minimizar el uso de la batería, es necesario minimizar el índice de rendimiento:

$$J = \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^8 e_i(t)i_i(t) \quad (VIII.30)$$

Siendo el índice de rendimiento del problema de control optimo multifase para la optimización de la trayectoria vertical el siguiente:

$$J = \sum_{N=1}^2 \int_{t_0^N}^{t_f^N} \sum_{i=1}^8 e_i(t)i_i(t) \quad (VIII.31)$$

Siendo N la fase de vuelo vertical (N=1 para crucero, N=2 para descenso).

El índice de rendimiento para la optimización de la trayectoria del eVTOL es:

$$J = \sum_{N=1}^2 \int_{t_0^N}^{t_f^N} \left( \sum_{i=1}^4 (P_{arm_i}) + TV \sin \alpha \right) dt \quad (VIII.32)$$

### 9. Restricciones de la ruta

Suponemos basado en estudios un ángulo de cabeceo no mayor de 6°:

$$-6^\circ \leq \theta_{fuselaje} \leq 6^\circ \quad (\text{VIII.33})$$

Se estudian los cambios del ángulo de cabeceo rotor-punta-plano de todos los rotores.

Para el conocimiento de la velocidad máxima, altitud y potencia se utilizan las especificaciones del Ehang 184:

$$0 \leq V_x \leq 27.78 \quad (\text{VIII.34})$$

$$0 \leq h \leq 3500 \quad (\text{VIII.35})$$

$$P_{required} \leq 152 \quad (\text{VIII.36})$$

Se impone la siguiente restricción de trayectoria en fase de descenso para evitar un nivel de vibración y pérdida de control en el rotor:

$$-0.28 \leq \frac{V \sin \alpha}{(v_h)_e} \leq 0 \quad (\text{VIII.37})$$

$$(v_h)_e = \sqrt{\frac{2T_{rotor}}{2\rho a A}} \quad (\text{VIII.38})$$

Siendo V la velocidad aerodinámica real del eVTOL, Tro rotor el empuje producido por el rotor, (vh)<sub>e</sub> la velocidad efectiva inducida en vuelo estacionario y α en ángulo de ataque.

El punto de referencia de la cima de descenso (TOD) está sujeto a restricciones de enlace de fase, trayectoria y control:

$$y^{N-1}(t_f^{N-1}) = y^N(t_0^N) \quad (\text{VIII.39})$$

### 10. Tiempo final fijo

La implementación del RTA en la optimización de la trayectoria del eVTOL es fundamental para la gestión de operaciones de la UAM. El RTA se impone como restricción de tiempo final en el problema de control óptimo multifase para aeronaves eVTOL. Como conclusión, el problema de optimización implica un tiempo final fijo (tf) y una posición [xf, hf]

$$t_f = RTA \quad (\text{VIII.40})$$

## Anexo IX

### Certificado CS-23

Es un certificado de aeronavegabilidad que permite operar en vuelo. Las CS son los requisitos legales que deben cumplir los aviones civiles para poder volar dentro de la UE, incluyendo requerimientos de despegue, aterrizaje y diseño.

Los aeroplanos se dividen en dos categorías de certificación:

- Certification Specifications (CS) Part 25: “Aeroplanos de transporte”, grandes aviones propulsados por motores a reacción
- Certification Specifications (CS) Part 23: “Aeroplanos pequeños”

Según la CS 23, además, los aviones pequeños se pueden dividir:

- Categoría normal, utilitaria y acrobática (masa al despegue igual o menor de 5670 kilogramos y 9 o menos pasajeros)
- Categoría “commuter”, aviones de hélice multirrotores (masa al despegue igual o menos a 8618 kilogramos y 19 o menos pasajeros)

Estas categorías dan lugar a las clases de maniobra y factores de carga [80].

## Anexo X

## Disposición de los pines del conector redundante de Veronte 4x

Tabla X.1.- Disposición de pines Veronte 4x

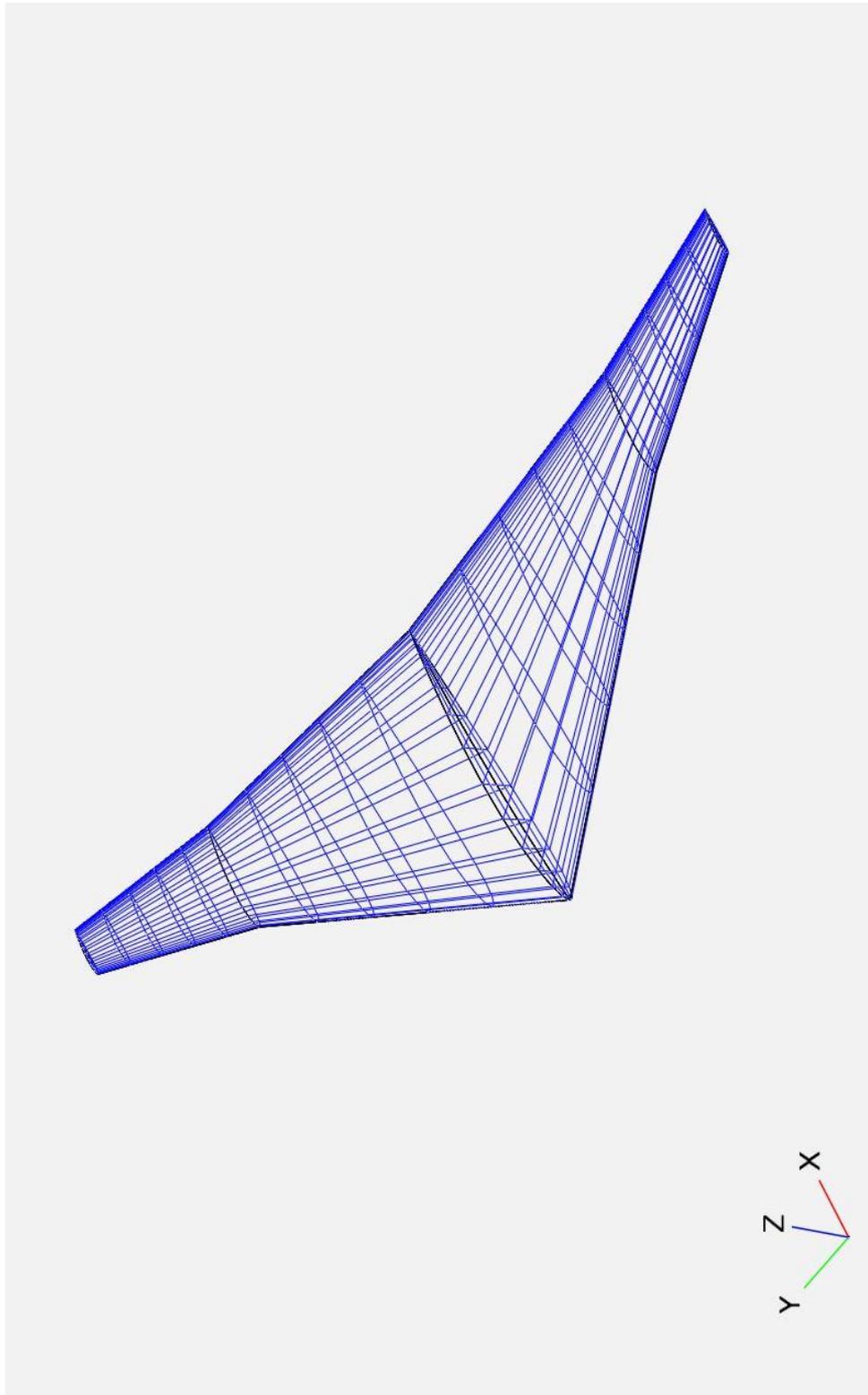
PIN	SEÑAL	TIPO	DOMINIO POTENCIA INTERNA	COMENTARIOS
1	I/O1	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
2	I/O2	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
3	I/O3	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
4	I/O4	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
5	I/O5	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
6	I/O6	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
7	I/O7	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
8	I/O8	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
9	GND	GROUND		GROUND SIGNAL FOR ACTUATORS 1-8
10	I/O9	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
11	I/O10	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
12	I/O11	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
13	I/O12	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
14	I/O13	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
15	I/O14	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
16	I/O15	I/O	A	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
17	I/O16	I/O	B	MUXED PWM/DIGITAL OUTPUT/DIGITAL INPUT SIGNAL (0-3.3V)
18	GND	GROUND		GROUND SIGNAL FOR ACTUATORS 9-16
19	RS_232_TX	OUTPUT	A	MUXED RS-232 OUTPUT
20	RS_232_RX	INPUT	A	REDUNDANT RS-232 INPUT
21	V2_USB_DP	I/O		VERONTE 2 USB DATA LINE
22	ANALOG_4	INPUT	B	REDUNDANT ANALOG INPUT 0-36V
23	ANALOG_5	INPUT	B	REDUNDANT ANALOG INPUT 0-36V
24	V2_USB_DN	I/O		VERONTE 2 USB DATA LINE
25	CANA_P	I/O		CANbud interface. Data rates up to 1Mbps Twisted pair with a 120Ω
26	CANA_N	I/O		
27	GND	GROUND		GROUND SIGNAL FOR BUSES
28	CANB_P	I/O		CANbud interface. Data rates up to 1Mbps Twisted pair with a 120Ω
29	CANB_N	I/O		
30	V2_USB_ID	I/O		VERONTE 2 USB ID LINE
31	I2C_CLK	OUTPUT	A	MUXED CLK LINE FOR I2C BUS
32	I2C_DATA	I/O	A	MUXED CLK LINE FOR I2C BUS
33	GND	GROUND		GROUND FOR 3.3V POWER SUPPLY
34	3,3V	POWER	B	3,3V-100mA POWER SUPPLY
35	GND	GROUND		GROUND FOR 5V POWER SUPPLY

36	5V	POWER	B	5V-100mA POWER SUPPLY
37	GND	GROUND		GROUND FOR ANALOG SIGNALS
38	ANALOG_1	INPUT	A	REDUNDANT ANALOG INPUT 0-36V
39	ANALOG_2	INPUT	A	REDUNDANT ANALOG INPUT 0-36V
40	ANALOG_3	INPUT	A	REDUNDANT ANALOG INPUT 0-36V
41	V2_USB_VSS	POWER		VERONTE 2 USB POWER (GND2 SHOULD BE USED FOR USB CONNECTOR)
42	V3_USB_DP	I/O		VERONTE 3 USB DATA LINE
43	V3_USB_DN	I/O		VERONTE 3 USB DATA LINE
44	GND	GROUND		GROUND SIGNAL FOR BUSES
45	UART_TX	OUTPUT	B	MUXED UART OUTPUT
46	UART_RX	INPUT	B	REDUNDANT UART INPUT
47	GND	GROUND		GROUND SIGNAL FOR BUSES
48	V3_USB_VCC	POWER		VERONTE 3 USB POWER (GND3 SHOULD BE USED FOR USB CONNECTOR)
49	V3_USB_ID	I/O		VERONTE 3 USB ID LINE
50	OUT_RS485_P	OUTPUT	B	NON-INVERTED OUTPUT FOR MUXED RS-485 BUS
51	OUT_RS845_N	OUTPUT	B	INVERTED OUTPUT FOR MUXED RS-485 BUS
52	IN_RS845_N	INPUT		INVERTED INPUT FOR MUXED RS-485 BUS
53	IN_RS485_P	INPUT		NON-INVERTED INPUT FOR MUXED RS-485 BUS
54	RS-485_GND	GROUND		GROUND FOR RS-485 BUS
55	EQEP_A	INPUT	A PARA VERONTE 1 Y 2 B PARA VERONTE 3	ENCODER QUADRATURE REDUNDANT INPUT A (0-5V)
56	EQEP_B	INPUT		ENCODER QUADRATURE REDUNDANT INPUT B (0-5V)
57	EQEP_S	INPUT		ENCODER STROBE REDUNDANT INPUT (0-5V)
58	EQEP_I	INPUT		ENCODER INDEX REDUNDANT INPUT (0-5V)
59	GND3	GROUND		VERONTE 3 GROUND INPUT
60	V1_USB_DP	I/O		VERONTE 1 USB DATA LINE
61	V1_USB_DN	I/O		VERONTE 1 USB DATA LINE
62	V1_USB_ID	I/O		VERONTE 1 USB ID LINE
63	V1_USB_VCC	POWER		VERONTE 1 USB POWER (GND 1 SHOULD BE USED FOR USB CONNECTOR)
64	VCC3	POWER		VERONTE 3 POWER SUPPLY (6.5 to 36V)
65	GND2	GROUND		VERONTE 2 GROUND INPUT
66	GND1	GROUND		VERONTE 1 GROUND INPUT
67	VCC2	POWER		VERONTE 2 POWER SUPPLY (6.5 to 36V)
68	VCC1	POWER		VERONTE 1 POWER SUPPLY (6.5 to 36V)

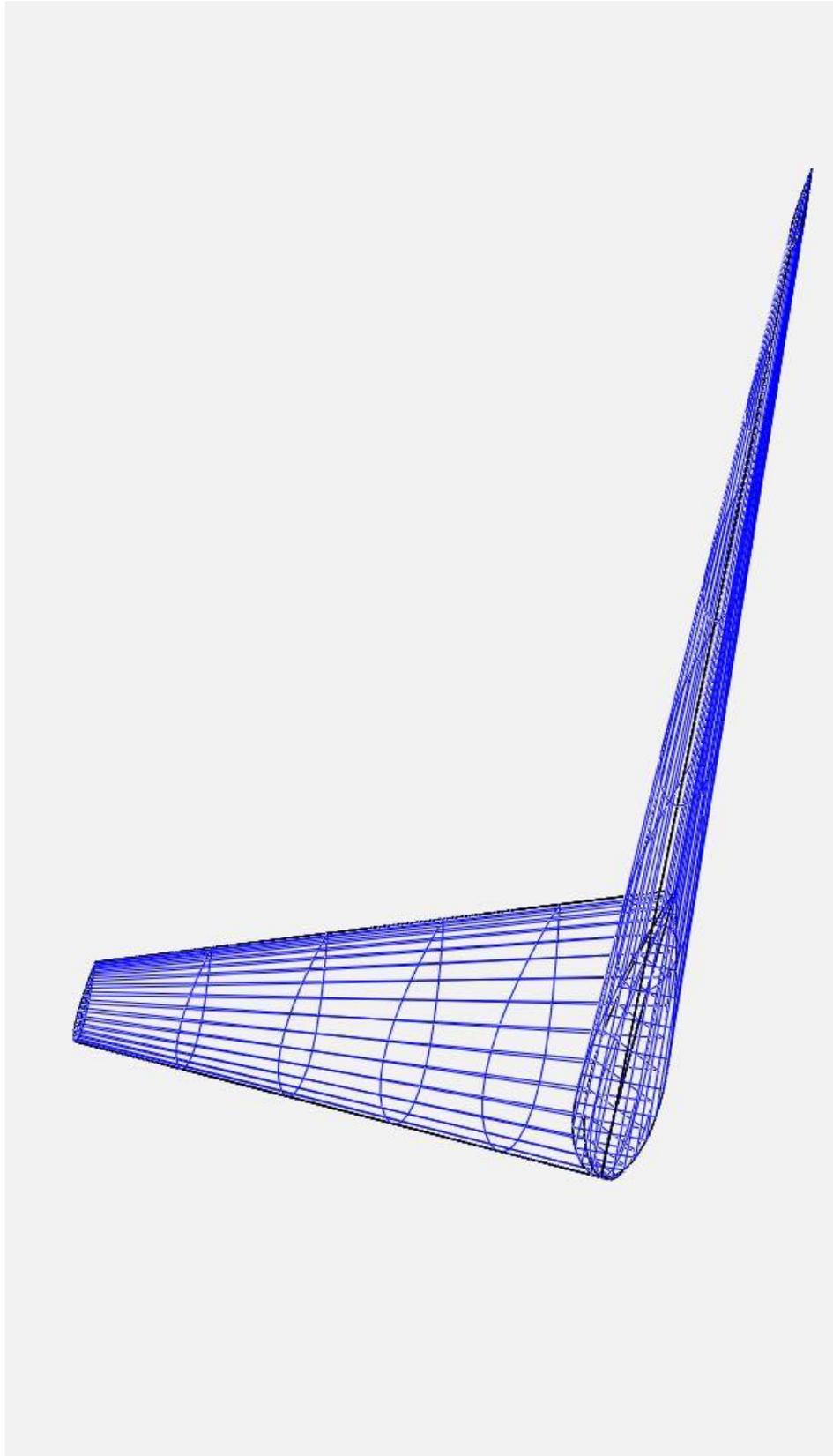
## Anexo XI

### Diseño eVTOL

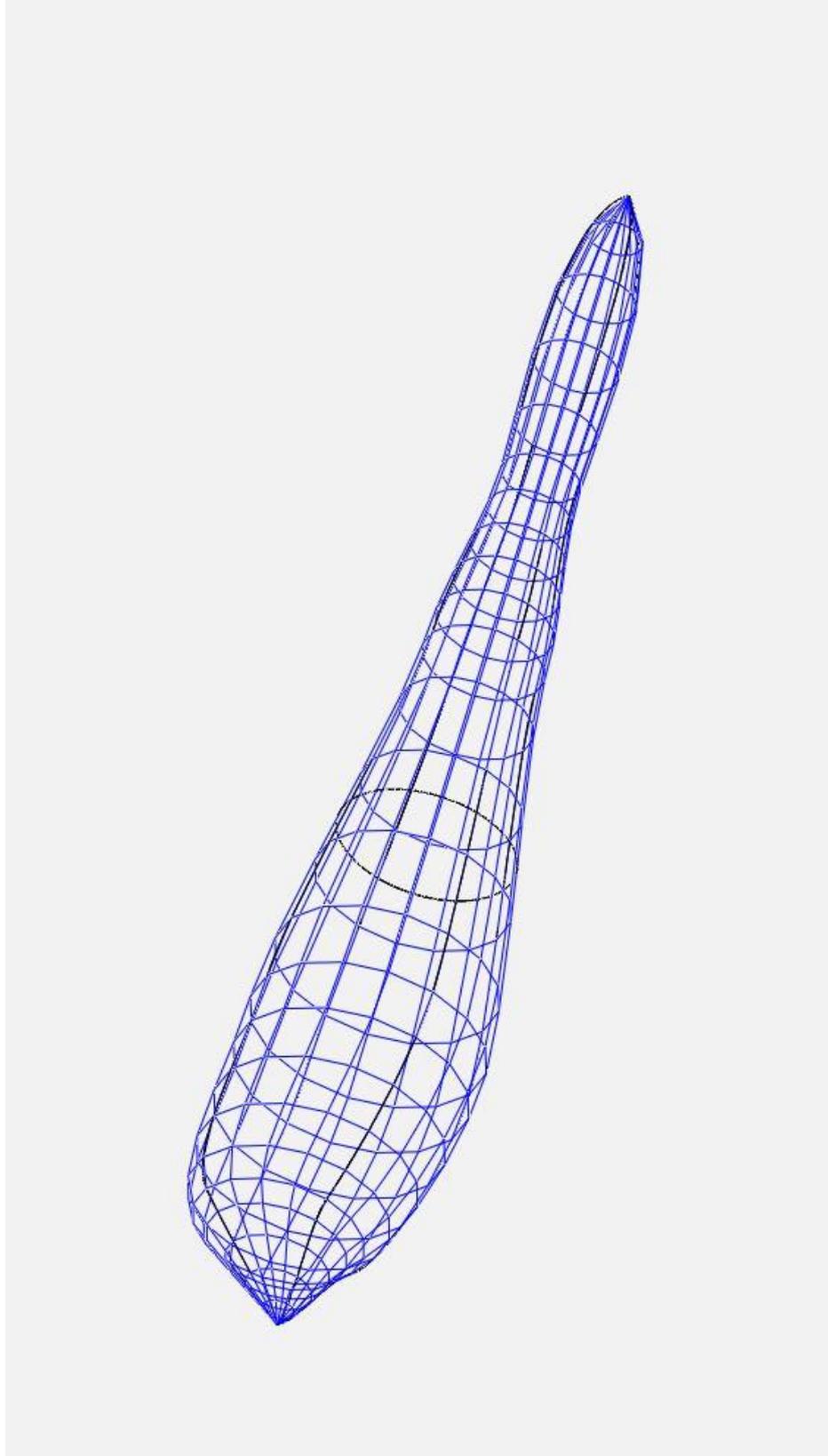
- Ala delantera



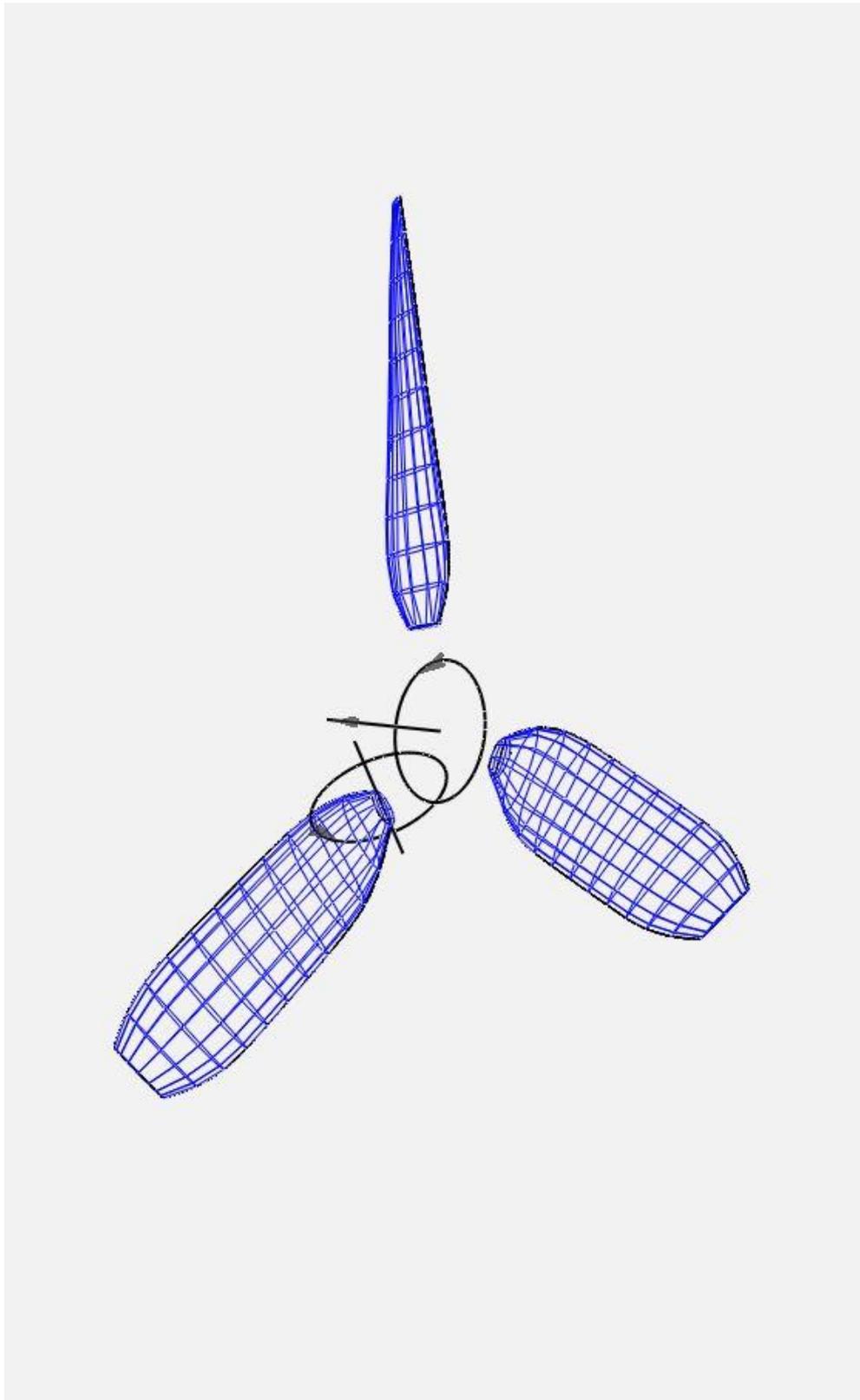
- Ala trasera



- Fuselaje



- Hélices



- Diseño completo

