



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DE AEROTAXIS

Autor: Fabien Bajard

Director: Dr. Antonio García y de Garmendia

Madrid

Agosto de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Fabien Bajard DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Diseño de una estación de aerotaxis*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de

derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 29 de agosto de 2019

ACEPTA

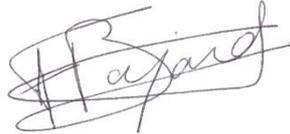
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Fabien Bajard', is written over a rectangular stamp that has been partially obscured by the signature.

Fdo FABIEN BAJARD

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
DISEÑO DE UNA ESTACION DE AEROTAXIS
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2018-2019, es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de
otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Fabien Bajard

Fecha: 29/08/2019



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Dr. Antonio García y de Garmendia

Fecha: 29/08/2019





COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER
DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DE AEROTAXIS

Autor: Fabien Bajard

Director: Dr. Antonio García y de Garmendia

Madrid

Agosto de 2019

DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DE AEROTAXIS

Autor: Bajard, Fabien.

Director: Dr. Antonio García y de Garmendia.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Cada día en el mundo, millones de horas se pierden en las carreteras. El mundo del transporte está evolucionando constantemente para cumplir con una demanda de movilidad cada vez más importante sin sobrecargar el tráfico. Las tendencias actuales incluyen en particular los diferentes métodos de transporte compartido y el desarrollo de medios de transporte innovadores, que sea en la fuente de energía o en el alto nivel de tecnología. En este contexto, los taxis voladores o aerotaxis aparecen como una solución para incrementar radicalmente la movilidad urbana. Dándole una tercera dimensión al tráfico urbano, los taxis voladores podrán reducir de forma drástica la congestión de los transportes terrestres. Crear una red de taxis voladores significa diseñar una nueva generación de medios de transporte. Los candidatos más probables e innovadores para este proyecto son las aeronaves VTOL (por Vertical Take-Off and Landing, es decir aeronaves de despegue y aterrizaje vertical), y más especialmente los modelos eléctricos, llamados aeronaves eVTOL. El objetivo es que estas aeronaves permitan un transporte rápido, fiable y seguro entre diferentes puntos de una misma ciudad, o también entre ciudades diferentes.

Lilium GmbH es una startup alemana fundada en 2015, con fin de proponer en 2025 un servicio completo de aerotaxis, incluyendo el diseño de su propia aeronave eVTOL, su fabricación en serie, y la gestión operacional del servicio de aerotaxis. El modelo de aeronave propuesto, el Lilium Jet, tiene una capacidad de 5 personas (4 pasajeros y 1 piloto), una autonomía de 300km, una velocidad máxima de 300km/h, y todo eso sin emisiones y sin ruido. El servicio que se quiere proponer consiste en trayectos aéreos entre varias estaciones definidas, reservables a través de una aplicación móvil. Si el foco está mucho ahora en el diseño y la certificación del Lilium Jet, la necesidad de crear las infraestructuras para acoger este nuevo medio de transporte es también un tema de interés creciente, para alcanzar el objetivo de comercialización del

servicio en 2025. Por eso, en este proyecto, se pretende dar una solución para el diseño de una estación de aerotaxis para Lilium.

Previamente al proceso de diseño de la estación de aerotaxis para Lilium, se ha realizado un estado de la cuestión que permite caracterizar en detalles la industria de los aerotaxis actualmente, y entender el modelo de negocio de Lilium a través de la realización del Business Model Canvas de la empresa.

La metodología elegida para el diseño de la estación de aerotaxis para Lilium ha sido la identificación por una parte de los diferentes requisitos técnicos procedentes de las normativas en vigor y de las especificaciones técnicas del Lilium Jet, y por otra parte de las diferentes necesidades de los clientes frente al servicio de aerotaxis propuesto por Lilium. Una vez identificados estos requisitos, se les han utilizado para justificar las diferentes decisiones en la elaboración del diseño de la estación.

De esta manera, se han extraído de la normativa de la Organización de Aviación Civil Internacional todos los criterios necesarios para que la pista de la estación cumpla con la regulación. Una pista consiste básicamente en cuatro tipos de áreas: las áreas de despegue y aterrizaje, las áreas de estacionamiento, las áreas de rodaje para mover entre las dos primeras, y las zonas de seguridad que tienen que ser libre de obstáculos. La mayoría de las dimensiones de estas zonas depende de una dimensión controladora que corresponde al máximo entre el ancho total y la longitud de la aeronave. Se han definido también las ayudas visuales necesarias en la pista, que sirven para identificar la estación y guiar los aerotaxis en las diferentes áreas.

Se ha también elaborado una ficha técnica del Lilium Jet que contiene todas las características de la aeronave necesarias para diseñar una estación adaptada al Lilium Jet. Incluye sus dimensiones, (en particular 11m de envergadura y 4,7m de longitud), su peso (aproximadamente 1700kg), la energía de la batería (estimada a 150kWh) y los diferentes tipos de mantenimiento necesarios.

Para identificar las diferentes necesidades de los clientes frente al servicio de aerotaxis, se han distinguido cuatro perfiles de clientes potenciales: el trabajador pendular, que realiza idas y vueltas cotidianas entre su domicilio y su trabajo, el turista urbano, que utiliza el aerotaxi para descubrir una ciudad, el residente comunitario, que quiere un medio de transporte para conectar su barrio con las actividades culturales de un centro urbano y el explorador ocasional, que busca un medio de transporte rápido para ocasiones especiales. El estudio de estos perfiles ha permitido estimar la variación de la demanda, en particular con tres picos de demanda durante

el día, de 7.00 a 9.00, de 14.00 a 16.00 y de 19.00 a 21.00. Se han también identificado los diferentes criterios de calidad del servicio para los clientes, en los que puede influir el diseño de las estaciones de aerotaxis: la implantación geográfica de las estaciones, la eficiencia de los diferentes flujos de personas y aerotaxis, la seguridad, la estética y el bienestar de los viajeros, y el cuidado del medioambiente.

La solución propuesta es un diseño de una estación de aerotaxis, justificado por los diferentes requisitos identificados más arriba. Se trata de un edificio propio de dos plantas dedicado enteramente al servicio de aerotaxis, con una planta baja para la recepción de los clientes y los controles de seguridad y una planta alta con la sala de espera y la pista de despegue y aterrizaje de los aerotaxis. Se ha elegido una configuración espacial de la pista "en racimo" para optimizar el espacio y los flujos de aerotaxis, de dimensiones de acuerdo con los criterios técnicos de la normativa y del Lilium Jet, como se muestra en la Figura A a continuación. El edificio de una superficie aproximativa de 3800m² permite el estacionamiento de cinco aerotaxis, con una zona de despegue y aterrizaje. La estación dispone de un sistema para cargar las baterías, mediante cargadores enchufables o battery-swapping. Existe también una opción de una planta intermediaria en el edificio para incluir diversas tiendas de interés para los utilizadores de la estación. En cada momento se ha presentado esta solución como una de las soluciones posibles, con varias alternativas si los criterios de diseño cambian.

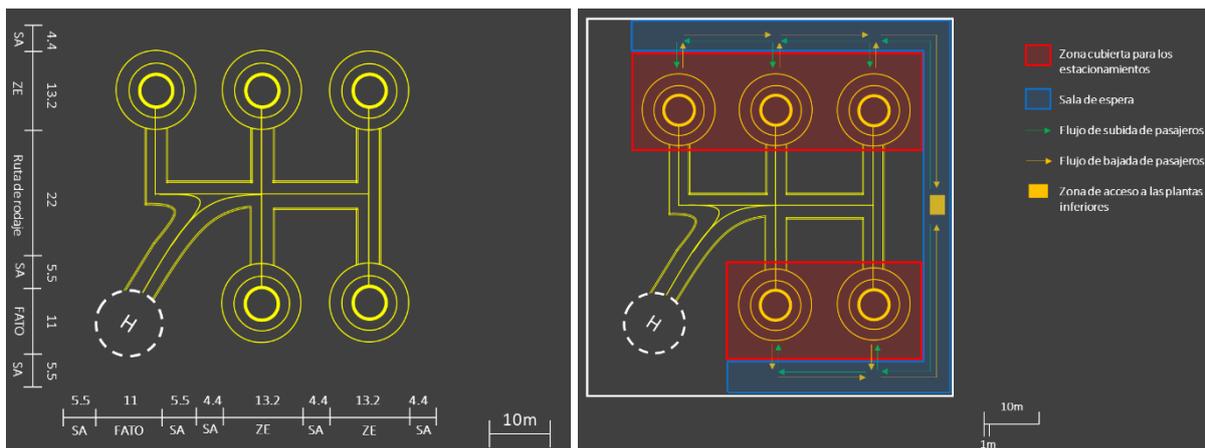


Figura A: Representación y dimensiones de la pista de la estación de aerotaxis diseñada, con los diferentes flujos y zonas añadidas en la parte derecha. Fuente: elaboración propia.

El proyecto incluye por fin un estudio económico sobre los costes de construcción de una estación de aerotaxis, estimada entre 1,53M€ y 3,93M€ según los escenarios (con un coste adicional de adquisición del terreno, estimado a 1,92M€), y sobre los costes anuales de operación de una estación, teniendo en cuenta los gastos para el personal (93 600€) y para el consumo de energía eléctrica (78 825€). Se ha identificado también una fuente potencial de ingresos anuales de 228 000€ con el alquiler de la planta intermediaria de la estación de aerotaxis.

DESIGN OF AN AIR TAXI STATION

Every day in the world, billions of hours are lost on the roads. The world of transport is constantly evolving in order to meet an increasing demand of mobility without overload the road traffic. The current trends include in particular different methods of transport sharing and the development of innovative means of transport, whether it be in the energy source or in the high level of technology. In this context, the flying taxis or air taxis appear to be a solution to radically increase urban mobility. By giving a third dimension to urban traffic, the air taxis could reduce drastically the engorgement of the ground transports. Creating a network of air taxis means designing a new generation of means of transport. The most probable and innovative candidates for this project are VTOL aircrafts (for Vertical Take-Off and Landing), and more especially the electric ones, called eVTOL aircrafts. The objective is that these aircrafts can enable a quick, reliable and safe transport between different points of the same city, or between different cities too.

Lilium GmbH is a German startup founded in 2015, with the goal to propose by 2025 a whole service of air taxi, including the design of its own eVTOL aircraft, its mass production and the operational management of the air taxi service. The aircraft model proposed, the Lilium Jet, has a capacity of 5 people (4 passengers and 1 pilot), an autonomy of 300km, a maximum speed of 300km/h, and all that without emissions and noise. The service that is intended to be proposed consists of air trips between different predefined stations, and bookable by means of a mobile application. If the focus is currently more on the design and certification of the Lilium Jet, the necessity of creating an infrastructure to support this new means of transport is also of growing interest, in order to meet the objective of commercialization of the service by 2025. That is why this project is intended to provide a solution for the design of an air taxi station for Lilium.

Before the process of designing the air taxi station for Lilium, a state of the art has been done in order to describe in detail the industry of the air taxis, and to understand the business model of Lilium through the realization of the Business Model Canvas of the company.

The chosen methodology for the design of the air taxi station for Lilium was to identify on one hand the different technical requirements coming from the regulation in force and from the technical specificities of the Lilium Jet, and on the other hand the different client needs for the air taxi service proposed by Lilium. Once identified these requirements, they were used to justify the different decisions in the elaboration of the design of the station.

In this way, all the required criteria to ensure the enforcement of the regulation were extracted from the standards of the International Civil Aviation Organization. A landing pad basically consists of four types of areas: the areas of take-off and landing, the parking areas, the taxiways to move between the two first areas, and the security areas that have to be free of obstacles. The majority of the dimensions of these areas depends on one controlling dimension that corresponds to the maximum between the total width and the total length of the aircraft. The visual aids necessary to identify the station and guide the air taxis on the different areas were also provided.

A technical sheet of the Lilium Jet, with all the characteristics of the aircraft necessary for the design of a station adapted to the aircraft, has also been elaborated. It includes its dimensions (in particular its 11m wingspan and 4,7m length), its weight (approximately 1700kg), the battery energy (estimated to 150 kWh) and the different types of required maintenance.

In order to identify the different client needs for the air taxi service, four potential client profiles have been distinguished: the business commuter, who makes daily roundtrips between its home and its workplace, the urban tourist, who uses the air taxi to discover a city, the community resident, who wants a means of transport to connect his district with the cultural activities of an urban center, and the occasional explorer, who seeks a quick means of transport for special occasions. The study of these profiles enabled to estimate the variation of the demand, in particular with three peaks of demand, between 7am and 9 am, between 2pm and 4 pm and between 7pm and 9pm. The different criteria for the quality of the service, that can affect the design of the air taxi station, were also identified: the geographical positioning of the stations, the efficiency of the different flows of people and air taxis, the safety, the aesthetics and the well-being of the travelers, and the concern for the environment.

The solution provided is the design of the air taxi station, justified by the different requirements identified before. It is a two-story building entirely dedicated to the activity of the air taxis, with a ground floor for the reception of the clients and the security controls, and a top floor with the waiting room and the take-off and landing pad. A "grape bunch"-shaped spatial configuration (as shown on the Figure A) has been chosen in order to optimize the space and the flow of air taxis, with dimensions in agreement with the technical criteria of the regulation and the Lilium Jet. The building, with an approximate surface of 3800m², enables the parking of five air taxis, with one take-off and landing pad. The station has a system in order to charge the batteries, with plug-in chargers or with a battery-swapping system. There is also an option for an intermediate floor in the building in order to include shops of interest for the users of the station.

In every moment, the solution has been provided as one of the solutions possible, with different alternatives if the designing criteria would change.

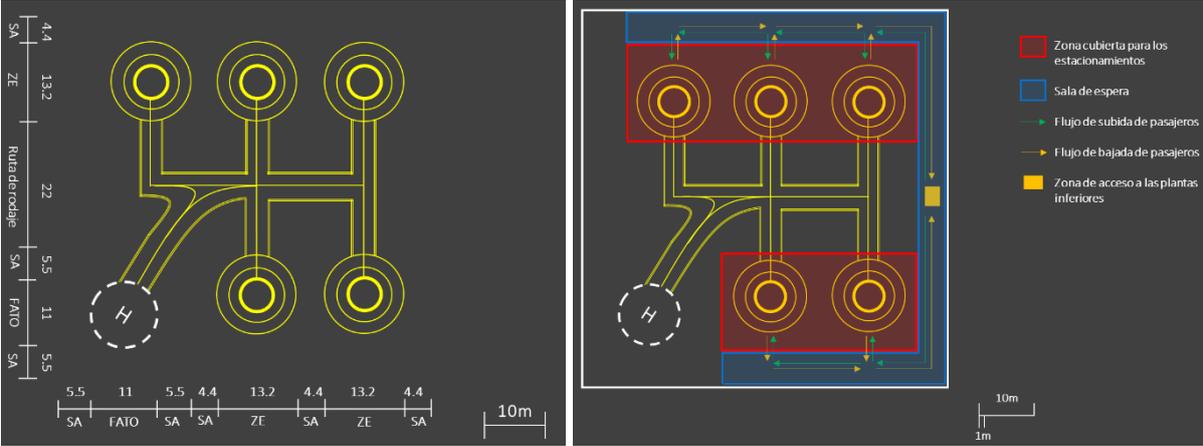


Figure A: Representation and dimensions of the pad of the designed air taxi station on the left, with the different flows and areas added on the right. Source: own creation.

Last but not least, the project includes an economic study about the construction costs of an air taxi station, estimated between 1,53M€ and 3,93M€ depending on the scenarios (with an additional cost estimated at 1,92M€ for the acquisition of the land), and about the annual operational costs of a station, considering the expenses for the staff (93 600€) and for the electricity consumption (78 825€). A potential source of income of 228 000€ has also been identified, by renting the intermediate floor of the air taxi station to shops.

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	- 5 -
1.1. Contexto y motivación del proyecto	- 5 -
1.2. Objetivos del proyecto	- 9 -
1.3. Estructura del trabajo	- 10 -
Capítulo 2: Estado de la cuestión	- 11 -
2.1. La industria de los aerotaxis.....	- 11 -
2.2. El modelo de Lilium.....	- 17 -
2.3. Las estaciones de aerotaxis	- 25 -
Capítulo 3: Requisitos técnicos de diseño.....	- 29 -
3.1. Requisitos por parte de la regulación	- 29 -
3.1.1. Metodología	- 29 -
3.1.2. Definiciones generales previas.....	- 30 -
3.1.3. Dimensiones de las diferentes zonas del vertipuerto	- 30 -
3.1.4. Obstáculos	- 34 -
3.1.5. Ayudas visuales.....	- 36 -
3.2. Requisitos por parte del Lilium Jet	- 39 -
3.2.1. Apariencia general del Lilium Jet	- 39 -
3.2.2. Dimensiones	- 41 -
3.2.3. Peso	- 42 -
3.2.4. Eficiencia energética y carga de baterías	- 42 -
3.2.5. Mantenimiento	- 45 -
Capítulo 4: Perfiles y necesidades cliente	- 47 -
4.1. Segmentos y perfiles de clientes	- 47 -
4.2. Variaciones de la demanda.....	- 50 -

4.3. Criterios de calidad del servicio	- 53 -
Capítulo 5: Propuesta de diseño	- 57 -
5.1. Implantación geográfica.....	- 57 -
5.2. Tipo de edificación.....	- 60 -
5.3. Disposición de la pista.....	- 62 -
5.4. Resto del edificio y flujos de personas.....	- 71 -
5.5. Equipamiento necesario para la operación y el mantenimiento de los aerotaxis	- 74 -
Capítulo 6: Estudio económico	- 77 -
6.1. Estimación del coste de construcción de una estación	- 77 -
6.2. Estimación de los costes e ingresos de operación	- 82 -
Capítulo 7: Conclusiones	- 85 -
7.1. Conclusiones sobre el cumplimiento y las aportaciones del proyecto	- 85 -
7.2. Limitaciones del proyecto y oportunidades de trabajos futuros.....	- 88 -
7.3. Perspectivas futuras para Lilium y las empresas de aerotaxis	- 89 -
Bibliografía.....	- 90 -

Índice de figuras

Figura 1: Fase actual de desarrollo de varios proyectos de aerotaxis, con elementos técnicos comparativos	- 13 -
Figura 2: Business Model Canvas de Lilium	- 19 -
Figura 3: Esquema de las diferentes zonas de un helipuerto y de sus dimensiones, en el caso de zonas circulares y cuadriláteras.....	- 32 -
Figura 4: Esquema de la zona sin obstáculos de un helipuerto, y diferentes escenarios con obstáculos válidos o no válidos.....	- 33 -
Figura 5: Anchos mínimos de pistas y rutas de rodaje terrestre y aéreo	- 34 -
Figura 6: Dimensiones de una superficie de subida de despegue o de acercamiento.	- 35 -
Figura 7: Posición y dimensiones de las áreas de transición.....	- 36 -
Figura 8: Forma y proporciones de las diferentes cifras y letras	- 37 -
Figura 9: Tabla de dimensiones del Lilium Jet.	- 41 -
Figura 10: Representación de las dimensiones del Lilium Jet.	- 42 -
Figura 11: Porcentaje de personas realizando la misma actividad principal en el mismo momento del día	- 50 -
Figura 12: Estimación de la variación diaria de la demanda del servicio de aerotaxi	- 51 -
Figura 13: Número de viajeros (unidad: miles de personas) mensuales en transporte urbano en Madrid: en naranja los usuarios del metro y en azul los usuarios de los autobuses.....	- 52 -
Figura 14: Mapa de las implantaciones potenciales de estaciones de aerotaxi y de las diferentes rutas entre ellos.....	- 58 -
Figura 15: Mapa de ciudades accesibles directamente desde Madrid con el Lilium Jet.....	- 59 -
Figura 16: Representación de diferentes configuraciones posibles para la pista de la estación de aerotaxis	- 63 -
Figura 17: Leyenda de los diferentes símbolos utilizados en los planos de la pista.	- 66 -
Figura 18: Plano dimensionado de la pista en configuración desacoplada	- 67 -
Figura 19: Plano dimensionado de la pista en configuración semi-estrella.	- 68 -
Figura 20: Plano dimensionado de la pista en configuración racimo.....	- 68 -
Figura 21: Tabla comparativa de las dimensiones y de la compacidad de tres configuraciones de pista: desacoplada, en semi-estrella y en racimo.....	- 69 -
Figura 22: Representación de la pista con diferentes ayudas visuales.	- 70 -

Figura 23: Cadena de etapas del cliente en el uso del servicio de un aerotaxi y su estación-	72 -
Figura 24: Representación de la planta alta de la estación de aerotaxis.....	- 72 -
Figura 25:Esquema de los diferentes flujos de persona entre las plantas de la estación de aerotaxis	- 73 -
Figura 26: Representación de la planta alta de la estación de aerotaxis con la zona potencial de battery-swapping	- 75 -
Figura 27: Estimación del coste total de construcción de una estación de aerotaxis en distintos escenarios	- 80 -

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Postal futurístico representando en 1900 el mundo como se lo imaginaba en el año 2000.	- 5 -
Ilustración 2: EHang 184.....	- 14 -
Ilustración 3: Prototipo del Bell Nexus.	- 15 -
Ilustración 4: Volocopter 2X.....	- 16 -
Ilustración 5: Lilium Jet	- 17 -
Ilustración 6: Componentes de un módulo de un Uber-Corgan Mega Skyport: la plaza de conexión, la estación, el puente y la cubierta de vuelo	- 26 -
Ilustración 7: Representación artística del Uber-Corgan Mega Skyport.....	- 26 -
Ilustración 8: Representaciones artísticas de proyectos de estaciones de aerotaxis para Uber por cuatro gabinetes de arquitectura: Beck Group, Mithun, BOKA Powell and Humphreys&Partners.	- 27 -
Ilustración 9: Vistas superior y lateral del Lilium Jet.	- 39 -
Ilustración 10: Cambio de posición horizontal a vertical de los ventiladores de la ala delantera	- 41 -
Ilustración 11: Vista de detrás del Lilium Jet.....	- 44 -

Capítulo 1: Introducción

1.1. Contexto y motivación del proyecto

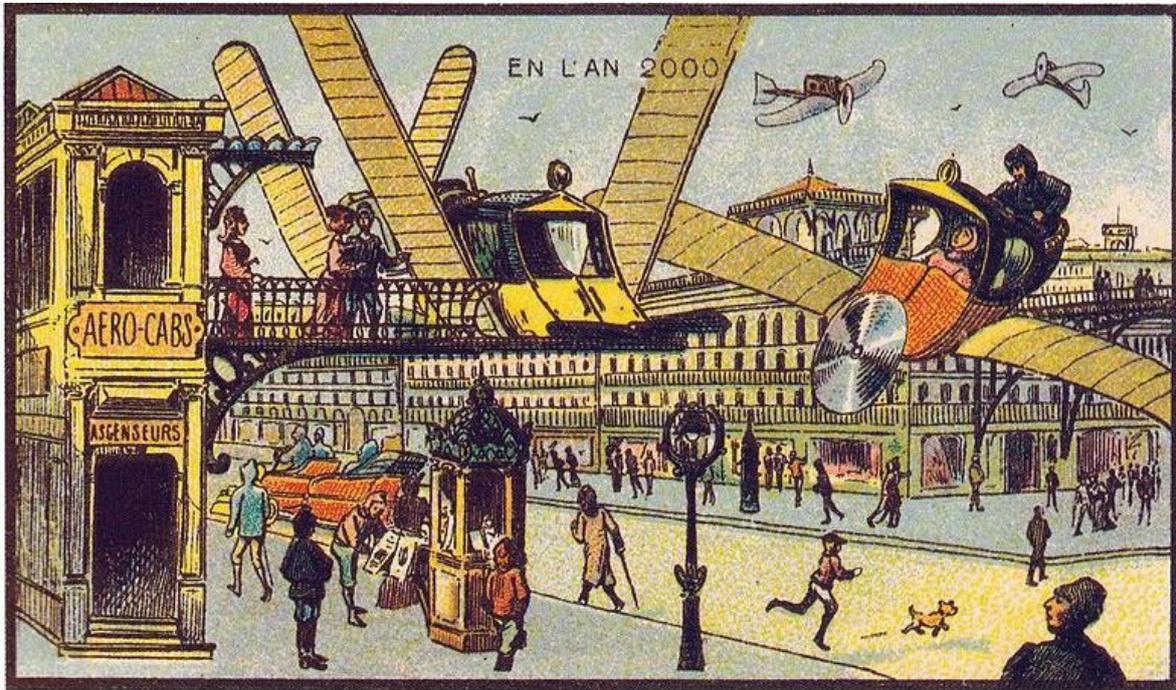


Ilustración 1: Postal futurístico representando en 1900 el mundo como se lo imaginaba en el año 2000. Fuente: Jean-Marc Côté [COTE99]

Blade Runner, El quinto elemento, Metropolis, Regreso al futuro... Los ejemplos de películas en las últimas décadas que figuran coches voladores no faltan [BAXT17]. Pero el deseo de libertad que acompaña el sueño de volar en una máquina es mucho más antiguo. Una de las primeras menciones se encuentra en la mitología griega con el mito de Dédalo e Ícaro que intentaron fabricarse alas para escaparse de la isla de Creta donde estaban retenidos. Los primeros proyectos "científicos" de máquinas volantes aparecieron al final del siglo XV, particularmente con los famosos bocetos de máquinas volantes de Leonardo da Vinci. Pero hay que esperar el desarrollo de los primeros aviones motorizados al principio del siglo XX para que el sueño se convierta en una realidad. Junto al desarrollo de la urbanización se creó un nuevo sueño, el de tener en las ciudades coches voladores, como lo muestra la Ilustración 1. Sin embargo, en 2019, aunque los aviones y los helicópteros forman parte integral del mundo del

transporte, seguimos a la espera de ver un nuevo medio de transporte parecido a un coche o un taxi volador, que permitiría realizar trayectos interurbanos e intraurbanos a escala individual. A pesar de diferentes iniciativas que fallaron en las últimas décadas, esto podría convertirse en una realidad en menos de una década con los aerotaxis.

Los aerotaxis no son sólo sueños de inventores, sino también responden a una demanda real. Cada día en el mundo, millones de horas se pierden en las carreteras. El mundo del transporte está evolucionando constantemente para cumplir con una demanda de movilidad cada vez más importante sin sobrecargar el tráfico. Las tendencias actuales incluyen en particular los diferentes métodos de transporte compartido (coches, bicicletas, scooters y ahora también patinetes) y el desarrollo de medios de transporte innovadores, que sea en la fuente de energía (eléctrica, híbrida, con celda de combustible) o en el alto nivel de tecnología (inteligencia artificial, sensores inteligentes, vehículos autónomos). Las ciudades van también adaptándose para acoger estos cambios, y proponer más movilidad a los usuarios de transporte, pero con cada vez más restricciones para limitar los atascos, el ruido y la contaminación, en particular en los centros urbanos.

En este contexto, los taxis voladores o aerotaxis aparecen como una solución para incrementar radicalmente la movilidad urbana. Dándole una tercera dimensión al tráfico urbano, los taxis voladores podrán reducir de forma drástica la congestión de los transportes terrestres. Crear una red de taxis voladores significa diseñar una nueva generación de medios de transporte. Los candidatos más probables e innovadores para este proyecto son los aviones VTOL (por *Vertical Take-Off and Landing*, es decir aviones de despegue y aterrizaje vertical), y más especialmente los modelos eléctricos, llamados aviones eVTOL. El objetivo es que estos jets permitan un transporte rápido, fiable y seguro entre diferentes puntos de una misma ciudad, o también entre ciudades. Hay varias empresas en el mundo, startups por la mayoría, que están actualmente desarrollando su propio eVTOL, pero de momento ninguna ha llegado a la etapa de la producción y de la comercialización de su vehículo. Los escenarios más optimistas planean tener un modelo funcional en 2020 para una comercialización del servicio de aerotaxis a partir de 2025.

El servicio podría ser al principio caro, porque el coste de diseño y de construcción de los aerotaxis es muy alto, pero con economías de escala y un aumento de la utilización del servicio,

el objetivo final es de hacerlo asequible como un taxi terrestre, para convertirse en una alternativa real a los medios de transporte convencionales. El modelo de comercialización del servicio más probable es adaptar lo que hace Uber actualmente para el transporte terrestre, es decir proponer un servicio accesible desde una aplicación móvil donde se puede localizar un aerotaxi y reservarlo directamente.

Se puede cuestionar la factibilidad del proyecto: ¿cuáles son las barreras que explican que estos proyectos no han sido concretizados antes y las evoluciones que indican que podrían realizarse en los años que vienen?

La primera barrera es tecnológica. En efecto, diseñar un aerotaxi eléctrico es un desafío de eficiencia y seguridad. La eficiencia, la durabilidad y el tiempo de recarga de las baterías eléctricas es uno de los puntos clave, tanto como la eficiencia del vehículo. Ambos problemas podrían ser resueltos gracias a las mejoras recientes y venideras de las baterías eléctricas para los coches terrestres y a las innovaciones en la industria de los drones.

La segunda barrera es regulatoria. Los diferentes vehículos deben respetar criterios estrictos de seguridad para cumplir con la regulación y obtener su certificación para volar. Debido a la novedad de los aerotaxis, las agencias internacionales de certificación podrían tardar más en acreditar los nuevos modelos de aerotaxis si las pruebas de fiabilidad y seguridad no son convincentes.

Por último, la tercera barrera es psicológica. A pesar de una autorización de las agencias internacionales de regulación del tráfico aéreo, hay que convencer las municipalidades de acoger este nuevo medio de transporte que representa un peligro en caso de accidentes o atentados y que podría ser considerada como una intrusión estética y auditiva en el cielo urbano. La adopción por los usuarios de un nuevo medio de transporte radicalmente diferente podría por una parte seducir por su carácter innovador y atípico, pero también dar miedo y provocar una cierta resistencia al cambio. Por eso la elección de ciudades pilotos y la identificación de la clientela son dos puntos cruciales para la implantación del servicio a gran escala.

Para que el servicio sea completo, se necesita no sólo los vehículos sino también unas infraestructuras adaptadas para acoger este nuevo medio de transporte. Según la densidad de los edificios en el espacio urbano, lo más conveniente puede ser o instalar las estaciones de

aerotaxis en techos inutilizados de edificios (que a veces ya tienen un helipuerto), o construir edificios propios que no sobrecargan el espacio urbano. La meta es de crear infraestructuras que conectan de forma sencilla y conveniente el mundo terrestre con el mundo aéreo, y que se adaptan perfectamente al uso de este nuevo medio de transporte.

Como se explicará más en detalle en el capítulo siguiente, hay varias startups que se han recientemente montado para emprender en el área del taxi volador o del avión eVTOL. Actualmente, ninguna tiene un vehículo funcional y toda la infraestructura necesaria para ofrecer un servicio de aerotaxi, la mayoría está en fase de desarrollo del vehículo.

Dado este contexto, había diferentes maneras de conducir este proyecto de fin de máster. La primera era presentar un modelo de negocio completo de una nueva empresa que se dedicaría a ofrecer un servicio de aerotaxis. Pero debido al carácter muy tecnológico de este tipo de empresa, era imposible proponer un producto mínimo viable que no sea una copia de uno existente. Entonces, la segunda opción era adaptar un modelo de negocio existente de una empresa de aerotaxis para las necesidades de España o en particular de Madrid. Pero como ninguna de estas startups ha llegado a la etapa de comercialización del servicio, era muy difícil evaluarlo de manera precisa. No obstante, debido al carácter muy novedoso y a las altas ambiciones de los proyectos de aerotaxis, hay mucho que se puede aportar a una startup de aerotaxis que ya existe, trabajando sobre uno de los tres pilares del servicio: la concepción de los vehículos, el diseño de la red de transporte y de las estaciones, y la implementación de la aplicación móvil de reserva. Es por este motivo que este proyecto se ha enfocado en el diseño de una estación de aerotaxis para una empresa precisa.

La elección de la empresa alemana Lilium se explica a través de varios motivos. Primero, es a partir de esta empresa que ha surgido la idea de este proyecto de fin de máster. Segundo, es una de las únicas empresas del sector que no sólo desarrolla su propio avión eVTOL sino también prevé la comercialización de su propio servicio de reserva de aerotaxis utilizando su eVTOL. Tercero, considerando la atención recibida de inversores potentes, el grado de avance de sus planes y los resultados ya conseguidos en las fases de test, Lilium es una de las empresas más prometedoras en el sector.

1.2. Objetivos del proyecto

Dado el contexto y la motivación del proyecto, el objetivo principal de este proyecto de fin de máster es simple: proponer un diseño de una estación de aerotaxis. Como es un proyecto académico y no un proyecto en empresa, el propósito no era trabajar directamente para Lilium en su departamento de infraestructuras, sino proponer un diseño a partir de información pública.

Este objetivo se puede subdividir en una serie de objetivos secundarios que estructuran el proyecto:

- Identificar los requisitos técnicos por parte de la regulación: analizar los puntos clave a la hora de diseñar una estación de aerotaxis que cumpla con las normativas en vigor;
- Identificar las necesidades de los clientes frente a un servicio de aerotaxis: listar las diferentes necesidades y clasificarlas de la más a la menos relevante, basándose en el uso de otros medios de transporte como el taxi, el avión o el helicóptero;
- Identificar las particularidades del eVTOL de Lilium y cómo influyen en el diseño de las estaciones: enfocar el diseño en las peculiaridades del jet de Lilium, dado que el ámbito del proyecto no es para cualquier eVTOL;
- Convertir todas esas necesidades y esos requisitos en criterios prácticos de diseño, y elaborar soluciones concretas incluyendo variantes para adaptarse a diversas situaciones;
- Proponer una análisis económica de una estación de aerotaxis dentro del servicio global de Lilium.

Este proyecto no es un proyecto de arquitectura o de ingeniería civil, sino de ingeniería industrial en el departamento de emprendimiento, así que el proyecto se enfoca más en las etapas de reflexión que conducen al resultado que en el resultado en sí. El objetivo es de proponer una guía para ayudar Lilium a tomar decisiones a la hora de diseñar una estación de aerotaxis. En todo el proyecto, se ha intentado ofrecer una visión objetiva de las diferentes alternativas, y de la misma manera, los resultados no son presentados como definitivos, sino como posibilidades y alternativas. Se reconoce que, para resolver algunas dificultades que superan el ámbito de este trabajo de fin de máster, y como es un documento académico y no profesional, se han tomado ciertas hipótesis que necesitarían un análisis más profundo en un contexto profesional.

1.3. Estructura del trabajo

Incluyendo este capítulo de introducción, para exponer el contexto, la motivación y los objetivos del proyecto, el trabajo consta de siete capítulos.

El capítulo 2, titulado *Estado de la cuestión*, presenta la situación actual de la de los aerotaxis. En una primera parte, se detallan las empresas que componen la industria de los constructores de aerotaxis en el mundo. Luego, la segunda parte se enfoca en la empresa Lillium más específicamente y expone su modelo de negocio. Por último, la tercera parte está más orientada en los diferentes proyectos de estaciones de aerotaxis que en los vehículos.

El capítulo 3, titulado *Requisitos técnicos de diseño*, constituye la parte técnica del proyecto. Presenta por un lado los principales requisitos que derivan de la reglamentación en vigor para el diseño de una estación de aerotaxis, y por otro lado los que derivan de las especificaciones del jet de Lillium, para ajustar el diseño de la estación al vehículo de la empresa elegida.

El capítulo 4, titulado *Perfiles y necesidades cliente*, identifica en un primer apartado los diferentes segmentos y perfiles de clientes potenciales de un servicio de aerotaxis. Eso permite dar, en un segundo apartado, una estimación de la variación de la demanda a escala diaria, semanal y anual, e identificar en un tercero apartado cuales son los criterios de calidad del servicio de aerotaxis para los clientes potenciales.

El capítulo 5, titulado *Resultados*, presenta el resultado del análisis de los dos capítulos anteriores: el diseño de una estación de aerotaxis. Se justificar el diseño detallando los diferentes aspectos de la infraestructura como su implantación, el tipo de construcción, la organización espacial de la pista con los flujos de aerotaxis, la organización espacial de la zona de espera con los flujos de personas.

El capítulo 6, titulado *Estudio económico*, ofrece una análisis simplificada del impacto de la construcción y de la operación de una estación de aerotaxis en términos económicos.

El capítulo 7, titulado *Conclusiones*, cierra el proyecto con una serie de conclusiones sobre las aportaciones y las limitaciones de este trabajo, dando perspectivas para el futuro.

Capítulo 2: Estado de la cuestión

Este capítulo se dedica a presentar una visión global y detallada del estado actual de la cuestión, primer paso imprescindible para el diseño de una estación de aerotaxis. En efecto, para identificar el ámbito de este proyecto, es fundamental entender quien compone actualmente la industria de los aerotaxis y como se estructura. También, como el objetivo del proyecto es diseñar una estación de aerotaxis para la empresa Lilium, es importante analizar cómo funciona Lilium, cuáles son sus motivaciones y su modelo de negocio. Por último, aunque las estaciones de aerotaxis no existan actualmente, se necesita saber, como referencia de trabajo, si hay otros proyectos existentes de diseño de aerotaxis actualmente. Por eso, este capítulo consta de tres apartados. En el primero, se presenta el estado actual de la industria de los aerotaxis, en particular quiénes son las empresas que la componen, cuáles son sus objetivos y su nivel de madurez. En el segundo, se presenta en detalles la empresa Lilium a través de su modelo de negocio, utilizando el Business Model Canvas. El tercero apartado presenta el estado de los proyectos de estaciones de aerotaxis.

2.1. La industria de los aerotaxis

En este proyecto, se entiende por aerotaxi un vehículo VTOL tipo dron de pasajeros. Un vehículo VTOL (por Vertical Take-Off and Landing) significa que es capaz de despegar y aterrizar de manera vertical y entonces no necesita largas pistas. La denominación eVTOL existe también para los vehículos que además son alimentados por energía eléctrica. Un dron de pasajeros es una aeronave que tiene varios rotores y que se puede utilizar para mover personas o cargamentos entre dos puntos definidos. Un dron de pasajeros puede ser pilotado manualmente por un piloto profesional, a distancia o automáticamente. Con esta definición, se excluyen los vehículos tipo coche volador tradicional, es decir coches que tendrían su función habitual y que podrían convertirse en modo avión para llegar hasta un aeropuerto. Se excluyen también los helicópteros, aunque pueden tener varios rotores y ser usados para transportar personas. En efecto, los helicópteros tradicionales no son adaptados para entornos urbanos, principalmente por motivos de ruido y de manejabilidad, y la nueva generación de drones de pasajeros VTOL no tiene nada que ver conceptualmente con los helicópteros tradicionales, que

sea su apariencia, su fuente de energía (la mayoría de los nuevos aerotaxis son eléctricos o híbridos), su velocidad máxima y su eficiencia energética.

Los diferentes avances tecnológicos y técnicos en el desarrollo de los vehículos han producido cambios recientes en la industria de los aerotaxis. Aunque estos tipos de aviones han empezado a ser ideados en los años 1980, la mayoría de los proyectos actuales siguen en fase de desarrollo o de test, y podrían ser comercializados en los años que vienen. Hay actualmente más de 80 empresas en el mundo desarrollando aviones eVTOL para un servicio de aerotaxis, y la gran mayoría de ellas no existían hace una década [SPER19]. Se prevé un crecimiento muy rápido de la industria de los aerotaxis, que podría representar un mercado de 1,5 billones de dólares en 2040 [MORG19]. La Figura 1 presenta una lista comparativa (y no exhaustiva) de estas empresas, indicando el grado de avance del proyecto y algunas especificaciones técnicas. Esta lista ha sido creada a partir de un informe de Deloitte de 2018 [DELO18], actualizado y completado por información pública obtenida en las páginas Web de las empresas y en comunicados de prensa. Algunas de estas empresas están descritas a continuación. Como Lilium es la empresa en la que basa el proyecto, será descrita más en detalles en el apartado siguiente.

EMPRESA	NOMBRE DEL VEHÍCULO	PAÍS	INICIO DEL PROYECTO	FASE ACTUAL DEL PROYECTO	FECHA DE LANZAMIENTO	FUENTE DE ENERGÍA	VELOCIDAD MÁXIMA (KM/H)	RANGO MÁXIMO (KM)	NÚMERO DE ROTORES	NÚMERO DE ASIENTOS
Airbus	A ³ Vahana	EEUU	2016	31/01/2018: primer vuelo de test conseguido	2020	Eléctrica	230	100	8	2
AirSpaceX	Mobi-One	EEUU	2017	fase de test	2021	Híbrida	240	420	4	5
Aurora Flight Sciences (Boeing)	PAV	EEUU	1989	22/01/2019: primer vuelo de test conseguido	2020	Eléctrica	180	80	9	2
Bartini	Bartini flying car	Rusia	2015	fase de prototipo	2020	Eléctrica	300	150	8	2/4
Bell	Nexus	EEUU	2017	fase de test	2024	Híbrida	290	240	6	5
EHang	184	China	2012	pendiente de certificación	2020	Eléctrica	160	16	8	1
Joby Aviation	S4	EEUU	2009	29/01/2019: anuncio del éxito de los vuelos de test	?	Eléctrica	320	240	6	4
Kitty Hawk	Cora	EEUU	2010	más de 400 vuelos de test realizados en 2018	?	Eléctrica	180	100	12	2
Lilium	Lilium Jet	Alemania	2015	04/05/2019: primer vuelo de test conseguido	2025	Eléctrica	300	300	36	5
Moller	Skycar M400	EEUU	1983	pendiente de certificación	2020	Etanol	500	1300	4	4
Volocopter	2X	Alemania	2012	certificación obtenida en 2016	2017	Eléctrica	100	27	18	2
VRCO	NeoXCraft	England	2016	fase de prototipo	2020	Eléctrica	330	120	4	2

Figura 1: Fase actual de desarrollo de varios proyectos de aerotaxis, con elementos técnicos comparativos. Fuente: elaboración propia en 2019 a partir de informe de Deloitte de 2018 [DELO18]

- **EHang 184:**

EHang es una empresa china fundada en 2014 cuyo objetivo es ser un líder y un pionero en el sector de los AAV (Autonomous Aerial Vehicles, o Vehículos Aéreos Autónomos). Han diseñado un primer vehículo llamado EHang 184 (por 1 pasajero, 8 hélices y 4 brazos). Es una aeronave tipo "Multicopter", es decir que su propulsión se realiza únicamente a través de múltiples hélices horizontales. Después de una serie de ensayos concluyentes entre 2015 y 2017, una segunda versión, el EHang 216 (que tendría 16 hélices y podría acoger 2 pasajeros) está en desarrollo. EHang planea implantarse en Austria a partir de 2019 y ha realizado en abril 2018 un vuelo de test público con el príncipe holandés Pieter Christiaan en el Amsterdam Arena [EVTO19]. La diferencia competitiva de EHang es de proponer directamente un vehículo autónomo, cuando la mayoría de sus competidores diseñan un vehículo con piloto que podría convertirse en un vehículo autónomo en el futuro. Es también la única empresa que eligió Austria como país de implantación, haciendo alianzas con empresas austríacas para fabricar su vehículo en grandes series.



Ilustración 2: EHang 184. Fuente: EHang [EHAN19]

- **Bell Nexus:**

Bell es una empresa americana con mucha experiencia en el área de los helicópteros, fundada en los años 1930. Fueron pioneros en muchos de los avances técnicos de la aviación civil y militar: el primer avión que rompió la barrera del sonido fue construido por Bell, tanto como el primer helicóptero comercial que obtuvo una certificación por una autoridad de aviación civil [BELL19]. Ahora Bell sigue su actividad proponiendo innovaciones, en particular para aeronaves de rotores basculantes o "convertiplanos", una categoría de vehículos VTOL. Por eso han decidido entrar en el mercado de los aerotaxis, y han revelado un prototipo de aerotaxi durante el Consumer Electronics Show en 2019, llamado el Nexus. El Nexus pertenece a una categoría diferente de aeronaves, en comparación con el EHang 184, porque sus propulsores giran para ser utilizados en dos posiciones: en posición horizontal para el aterrizaje y el despegue, y en posición vertical para el viaje. La ventaja competitiva de Bell no es sólo su experiencia, ya que la propulsión de su vehículo se realiza en colaboración con Safran, una de las empresas aeronáuticas más potentes en el mundo, y Bell planea utilizar esta flota de aerotaxis para proponer un servicio en colaboración con Uber [EVTO19].



Ilustración 3: Prototipo del Bell Nexus. Fuente: Bell [BELL19]

- **Volocopter 2X:**

Volocopter es una startup alemana que fue creada en 2011. El mismo año, el primer prototipo rudimentario llamado VC-1 permitió comprobar que era posible para un ser humano volar en un dron de pasajeros eléctrico. Con el soporte de inversores potentes como Intel y Daimler, Volocopter desarrolló varios prototipos sucesivos de aerotaxis, la última versión siendo el 2X. El Volocopter 2X tiene fama de ser muy intuitivo para conducir, muy manejable y estable, lo que convierte esta aeronave en un vehículo totalmente adaptado para un entorno urbano. La ventaja competitiva de Volocopter es la disponibilidad de su producto: el Volocopter 2X es la primera aeronave eVTOL tipo "Multicopter" que obtuvo una certificación para un vuelo tripulado en 2016, lo que permitió a la empresa iniciar una serie de ensayos en condiciones reales en varios lugares del mundo [VOLO19].



Ilustración 4: Volocopter 2X. Fuente: EVTOL News [EVT019]

2.2. El modelo de Lilium

Lilium GmbH es una empresa de aerotaxis fundada en 2015 por cuatro ingenieros alemanes Daniel Wiegand, Sebastian Born, Patrick Nathen y Matthias Meiner. La sede social se encuentra en Wessling, cerca de Múnich, en Alemania.

Aunque es una empresa reciente, Lilium ha conseguido un crecimiento impresionante. En efecto, a finales de 2015, el primero prototipo en escala 1:2 ya estaba listo para una serie de test. Dos años después, en 2017, consiguen el vuelo del primero prototipo en escala real de un jet con dos asientos. El año 2019 marca una grande etapa en el desarrollo de la empresa con el primero vuelo de una versión funcional del Lilium Jet. Ahora el objetivo de Lilium es de proponer un servicio completo de aerotaxi para 2025 [LILI19].

A nivel técnico, el Lilium Jet es una aeronave tipo eVTOL que pertenece a la misma categoría de "propulsión giratoria" que el Bell Nexus, es decir que son los mismos propulsores que sirven para que la aeronave aterrice y despegue de forma vertical y para que la aeronave vuele de forma horizontal. Por asegurar los dos modos de vuelo, los propulsores cambian de posición girando alrededor de un eje horizontal. El modelo actual del Lilium Jet tiene una capacidad de 5 personas (cuatro pasajeros y el piloto), puede alcanzar una velocidad de 300km/h y tiene un rango de 300km (y entonces 1 hora de autonomía), gracias a 36 propulsores. Más detalles técnicos sobre el Lilium Jet se encuentran en el Capítulo 3.



Ilustración 5: Lilium Jet. Fuente: Lilium [LILI19]

Para describir más de forma completa el modelo de la empresa Lilium, se ha elegido el Business Model Canvas, como se puede ver en la Figura 2, y explicado a continuación.

- **Propuesta de valor:**

Lilium se dedica a la creación de un servicio completo y revolucionario de aerotaxis, incluyendo el diseño y la fabricación de su propia aeronave eVTOL, y la operación del servicio. Por eso, proponen un nuevo medio de transporte rápido, con un impacto medioambiental reducido, asequible y reservable con un simple clic. Pero más que proponer un nuevo vehículo, la visión de Lilium es de revolucionar la manera de viajar y de conectar las comunidades.

Uno de los objetivos de Lilium es alcanzar un nivel de eficiencia operativa muy alto para mantener costes bajos y hacer de su aerotaxi un medio de transporte competitivos con otros como el taxi terrestre, y asequible para cualquiera persona que quiere irse de un punto A a un punto B.

Quieren también que el servicio de aerotaxis esté accesible para la gente no solamente financieramente sino también físicamente, implantándose no exclusivamente en áreas urbanas densas. En efecto, como no se necesita infraestructuras para unir dos puntos (como un camino, una carretera o una vía férrea, por ejemplo), se expanden las posibilidades de conexiones entre diferentes lugares, y las oportunidades económicas, sociales y culturales para la gente que puede beneficiar de este servicio. Así el servicio de aerotaxis podría permitir conexiones entre puntos centrales de una misma área urbana, pero también conexiones entre centros y zonas periféricas, y entre ciudades.

Por otro lado, la contaminación debida a los transportes en el mundo es un problema crítico en el mundo actual, y Lilium incluye en su propuesta de valor una reducción de esta contaminación. Para evaluar el impacto medioambiental real de su Jet, habrá que conducir análisis más profundas del ciclo de vida del producto una vez el servicio puesto en marcha, pero lo seguro es que no hay emisiones de gases de efecto invernadero porque son vehículos eléctricos, que pueden reducir la congestión terrestre en las áreas urbanas densas y entonces la contaminación de estas zonas y que pueden ser una alternativa a otros medios de transporte sucios, por ejemplo reduciendo el uso del avión tradicional para los vuelos de corto recorrido. Lilium declara también que se compromete a convertirse en una empresa neutra en emisiones de dióxido de carbono.

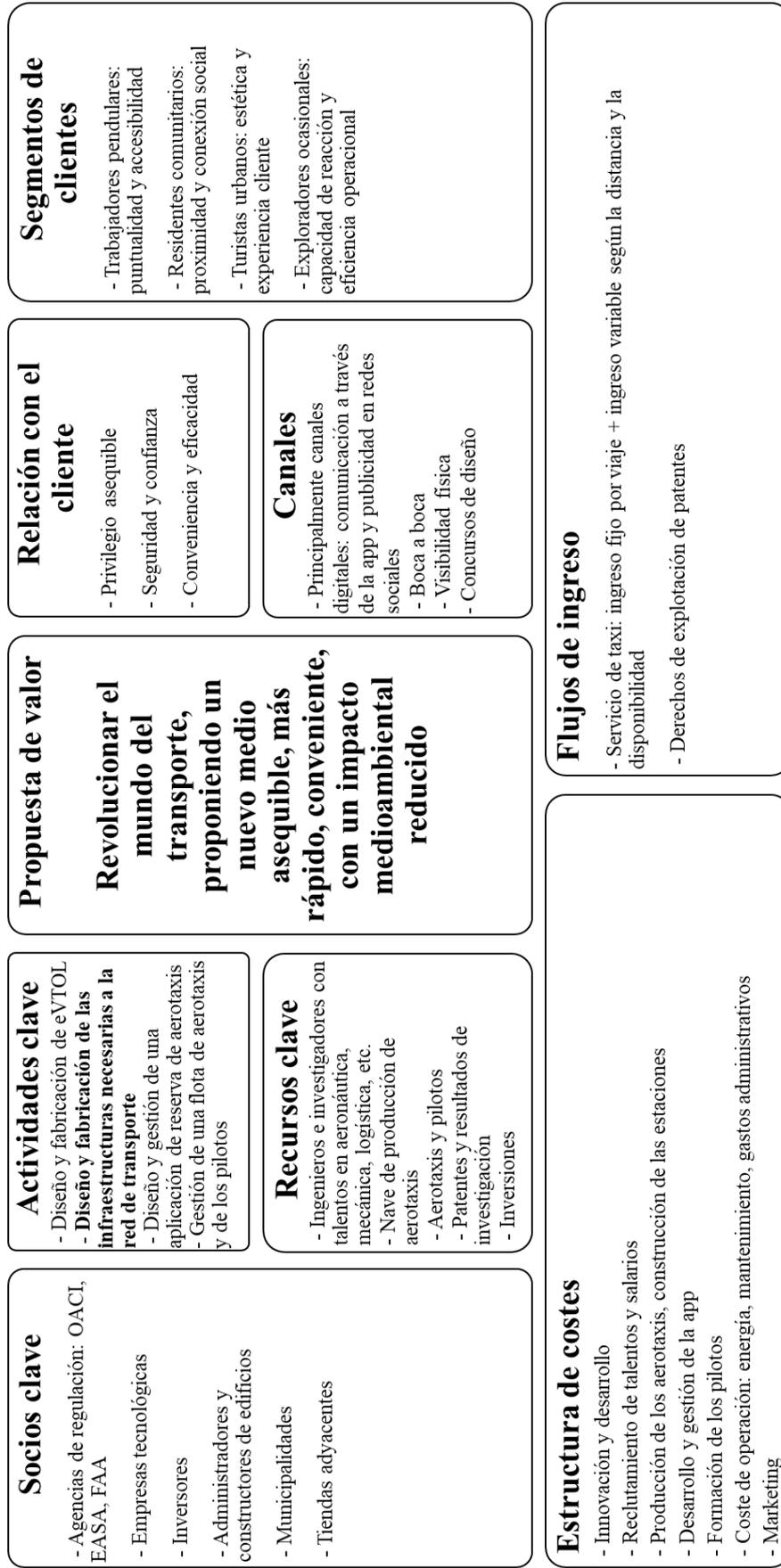


Figura 2: Business Model Canvas de Liliium. Fuente: elaboración propia, 2019

- **Actividades clave:**

Las principales actividades de Lilium son:

- el diseño de su propia aeronave eVTOL, el Lilium Jet, lo que implica una grande implicación en un proceso de desarrollo de producto complejo, con varias fases de ensayos;
- la fabricación en serie de su aeronave eVTOL: una vez terminada la fase de creación del vehículo, habrá que producir una flota suficiente de aerotaxis;
- el diseño y la fabricación de las infraestructuras necesarias a la red de aerotaxis: sin estaciones de aerotaxis, el servicio no puede existir. Hasta ahora, la empresa ha sido muy secreta sobre el desarrollo de sus infraestructuras, comunicando más sobre el desarrollo de su aeronave. En efecto, la empresa parece más enfocada en la realización de su vehículo, etapa necesaria para el lanzamiento del servicio y para convencer los inversores;
- el diseño y la gestión de una aplicación de reserva de aerotaxis. Este tipo de aplicación móvil ya existe de varias formas para taxis terrestres (Uber, Cabify, por ejemplo) y habrá que adaptar una versión para aerotaxis.
- la gestión de una flota de aerotaxis y del servicio en general. Una vez el servicio creado, Lilium deberá gestionar toda la operación de su servicio, lo que incluye en particular la elección de las implantaciones de nuevas estaciones, la repartición de la flota de aerotaxis, el mantenimiento de los aerotaxis, la gestión y formación de los pilotos.

- **Socios clave:**

Para alcanzar sus diferentes objetivos, Lilium tiene que cooperar con varios socios:

- las agencias internacionales de regulación de la aviación civil: Esta categoría incluye agencias como la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) que promueven reglamentos y normas en la aeronáutica mundial, y las agencias que certifican los vehículos aéreos como la EASA (Agencia Europea de Seguridad Aérea) en Europa y la FAA (Administración Federal de Aviación) en Estados Unidos. En efecto, Lilium necesita colaborar con estas agencias para cumplir con las normativas y obtener lo antes posible una certificación por su vehículo, sin la cual sus proyectos podrían ser retrasados de varios años y perjudicar a la salud de la empresa.

Intervienen también en el proceso de diseño de la estaciones de aerotaxis que deben cumplir con la normativa en vigor, lo que detalla el Capítulo 3.

- las empresas tecnológicas: Como dicho en introducción, hubo varias evoluciones tecnológicas recientes que permitieron el desarrollo de startups de aerotaxis, pero más innovaciones son necesarias para alcanzar un buen funcionamiento y una buena eficiencia energética. En el caso de Liliium, una colaboración con una empresa especializada en baterías eléctricas podría ayudarles a alcanzar y sobrepasar sus objetivos de velocidad y autonomía. Esta colaboración se puede hacer también mediante la compra de los derechos de explotación de patentes pertinentes para el aerotaxi.

- los inversores: Una startup reciente y ambiciosa como Liliium necesita el apoyo de varios inversores. Liliium obtuvo 10 millones de dólares en una primera ronda de financiación en 2016 (Series A) y más de 90 millones de dólares en una segunda ronda de financiación en 2017 (Series B). Los principales inversores de Liliium son Tencent, poderoso grupo chino que pertenece al top 10 de las empresas públicas con mayor capitalización de mercado y especializado en tecnologías de comunicación y en servicios Web, LGT, un grupo bancario de la Casa Princesca de Liechtenstein, y Obvious Ventures, Atómico y Freigeist, tres empresas de Venture Capital especializadas en startups tecnológicas.

- los administradores y constructores de edificios: En función de la manera elegida por Liliium para implantar sus estaciones de aerotaxis, necesitará o la colaboración de administradores de edificios para instalarse en azoteas de edificios existentes o la colaboración de constructores de edificios para crear nuevas infraestructuras.

- las municipalidades: Un punto clave para el desarrollo del proyecto de Liliium es obtener el acuerdo de varias ciudades para experimentar su servicio de aerotaxi, convenciéndolas de la utilidad y de la seguridad de su servicio, y luego para expandir su red de transporte entre ciudades.

- los negocios, las empresas y los servicios adyacentes a las estaciones: Los lugares de implantación de las diferentes estaciones son muy estratégicos para dinamizar las actividades económicas y culturales alrededor, y al revés la presencia de una actividad económica o cultural

cerca de una estación sirve para aumentar la clientela de los aerotaxis, en una situación en la que todos ganan.

- **Recursos clave:**

Los recursos clave para el desarrollo de las actividades de Lilium son de tres tipos: financieros, físicos e inmateriales.

A nivel financiero, como dicho más arriba, para soportar su fase de diseño, la empresa dispone de más de 100 millones de dólares de inversiones, y necesitará probablemente una tercera ronda de inversiones a la hora de producir a nivel industrial su flota de aeronaves y de implantar su servicio de aerotaxis.

A nivel físico, la empresa necesita una sede social y un laboratorio donde se puede desarrollar su producto y realizar múltiples ensayos. Necesitará también una fábrica para producir en serie los Lilium Jets, y una vez los vehículos construidos, representan un recurso clave para el servicio de transporte.

A nivel inmaterial, los diferentes patentes y los diferentes resultados de investigación y de los ensayos conducidos constituyen un recurso clave para una empresa con un nivel tan alto de tecnología. Para obtener todos estos conocimientos científicos, hay que contratar empleados que pueden aportar su experiencia a la empresa. Por ejemplo, el actual VP Producción de Lilium era VP Industrial de Airbus y responsable del ensamblaje del A320 y del A380.

- **Relación con el cliente:**

La relación con el cliente se base en tres puntos:

- un "privilegio asequible": Aunque Lilium quiere proponer un servicio asequible para todos, quiere también ofrecer la mejor experiencia a los utilizadores de sus aerotaxis. Por eso, el diseño del aerotaxi prevé una cantidad de vibraciones y de ruido reducida, y una apariencia prolija con un estilo depurado.

- seguridad y confianza: Como el servicio propuesto por Lilium es muy novedoso, hay que convencer a la gente que todo es bajo control y seguro. Por eso, Lilium basa su relación de confianza en principios tecnológicos de redundancia, asegurando a los utilizadores que, en caso de fallo, todo es previsto para evitar accidentes.

- conveniencia y eficacia: La principal ventaja de este nuevo medio de transporte es su rapidez. Un punto clave de Lillium para su relación con el cliente es de proponer y mantener un alto nivel de eficacia y de conveniencia de su servicio. Como hay muchas alternativas en el mundo del transporte, el desempeño y la puntualidad del servicio son unos criterios de calidad fundamentales.

- **Canales:**

Los canales para el contacto con los clientes son principalmente digitales: actualmente se limita a publicidades en las redes sociales, y artículos en los periódicos y en blogs especializados en aeronaves VTOL. Una vez creada la aplicación de reserva Lillium, será el canal principal para el intercambio de comunicaciones entre la empresa y los clientes. Habrá también una parte de comunicación a través de su visibilidad física, cuando las aeronaves vuelen. Como el servicio está en fase de desarrollo, de momento la mayoría de la comunicación se hace a través del boca a boca. La obtención de premios de diseño o empresariales como el premio Red Dot "Best of the best" o el premio FT Boldness in Business "Best Smaller Company" en 2019 es también una manera de obtener una credibilidad y un reconocimiento en el mundo profesional.

- **Segmentos de clientes:**

Como dicho más arriba, la visión de Lillium no es de crear un medio de transporte solamente para las franjas más adineradas de la sociedad, sino un medio de transporte asequible para todos. Se puede identificar varios segmentos de clientes que podrían ser interesados en el servicio, como trabajadores pendulares, residentes comunitarios, turistas urbanos y exploradores ocasionales. No se entra más en detalles sobre los segmentos de clientes en este párrafo porque consiste una parte del capítulo 4 con la identificación de la demanda y de las necesidades de los clientes.

- **Estructura de costes:**

La estructura de costes depende de la fase de desarrollo de la empresa. Actualmente, los costes de innovación y desarrollo, tanto como los de reclutamiento de talentos y sus salarios, representan la parte más importante de los costes de la empresa.

Una vez el prototipo válido y certificado, habrá que considerar el coste de producción en serie de los aerotaxis, y también el coste de construcción de las diferentes estaciones de aerotaxis. El

desarrollo y la gestión de la aplicación de reserva, la formación de los pilotos de aerotaxis, el marketing y la promoción del servicio, tienen también un coste no despreciable.

Por último, si bien no menos importante, hay que considerar todos los costes de operación como la energía eléctrica consumida, el mantenimiento de los aerotaxis y los gastos administrativos.

- **Flujos de ingreso:**

Los ingresos vienen principalmente del servicio de taxi. Es muy probable que como para un servicio de taxi tradicional, la empresa cobre un ingreso fijo por viaje más un ingreso variable según la distancia, la disponibilidad y/o la franja horaria.

Según la evolución de la empresa, pero poco probable considerando los objetivos actuales, los ingresos podrían venir de la venta de una parte de la flota de aerotaxis, o de la venta de derechos de explotación de patentes.

2.3. Las estaciones de aerotaxis

Actualmente, no existe ninguna infraestructura dedicada para el aterrizaje y el despegue de aerotaxis. Los helipuertos para helicópteros podrían ser utilizados como estaciones para los aerotaxis, pero hay muy pocas infraestructuras existentes, porque el helicóptero no es un medio de transporte muy utilizado.

Además, la mayoría de las empresas que diseñan aerotaxis son empresas aeronáuticas especializadas en la creación y la fabricación de vehículos, pero no quieren encargarse de la parte operativa del servicio de aerotaxi. Lillium forma parte de las excepciones porque su proyecto es de también gestionar toda la parte operativa del servicio, pero no ha revelado ninguna información pública sobre sus estaciones de aerotaxis, aparte de ilustraciones en su página Web.

Al contrario, habrá probablemente en el futuro empresas que se dedicarán exclusivamente a la parte operativa del servicio, desarrollando su infraestructura propia, pero utilizando modelos de aerotaxis existentes. La única empresa que ya está involucrada en este tipo de proyectos es Uber. En efecto, en octubre de 2016, Uber publicó un libro blanco "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation"[UBER16], marcando el inicio de su rama Uber Elevate. Uber está desarrollando un nuevo servicio de viaje urbano compartido aéreo, Uber Air, con una flota de aeronaves eVTOL. El objetivo es de empezar a proponer el servicio en 2023 en tres ciudades internacionales, probablemente Dallas, Los Angeles y Melbourne [BOND19]. Uber organiza también cada año desde 2016 un simposio internacional, el "Uber Elevate Summit". La edición de 2019 reunió más de 1,200 representantes de grandes empresas tecnológicas, aeronáuticas, de transporte y también gubernamentales interesados en los planos de Uber para desplegar su servicio aéreo de transporte a la demanda mediante una flota de aeronaves eVTOL. Para desarrollar su flota de aerotaxis, Uber ha anunciado una alianza con seis empresas fabricantes de aerotaxis: Aurora Flight Sciences, Bell, EmbraerX, Karem Aircraft, Pipistrel Vertical Solutions and Jaunt Air Mobility. Uber colabora también para su rama Elevate con la NASA, el laboratorio de investigación de la armada estadounidense (ARL), y varias universidades como Georgia Tech, Ecole Polytechnique y UT Austin [UBER19].

Uber atrae y colabora también con gabinetes de arquitectura y obras civiles para proponer nuevos conceptos de estaciones de aerotaxis. Por ejemplo, a continuación, se muestra el ejemplo

del proyecto "Uber Mega Skyport" propuesto por el gabinete estadounidense CORGAN en 2018. Los criterios de diseño puestos de relieve incluyen flexibilidad (un diseño modular para adaptarse a entornos urbanos diferentes), conectividad (conexión con otros medios de transporte, llegada rápida a la aeronave) y presión física del edificio reducida (para no sobrecargar el espacio urbano).

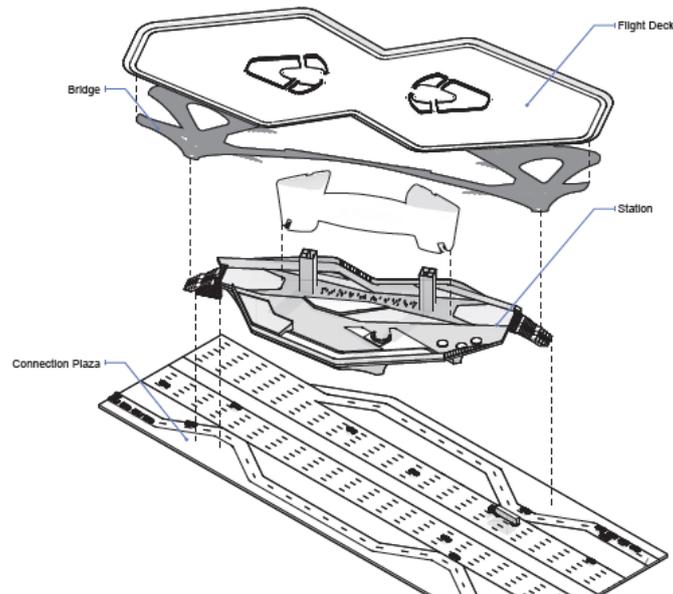
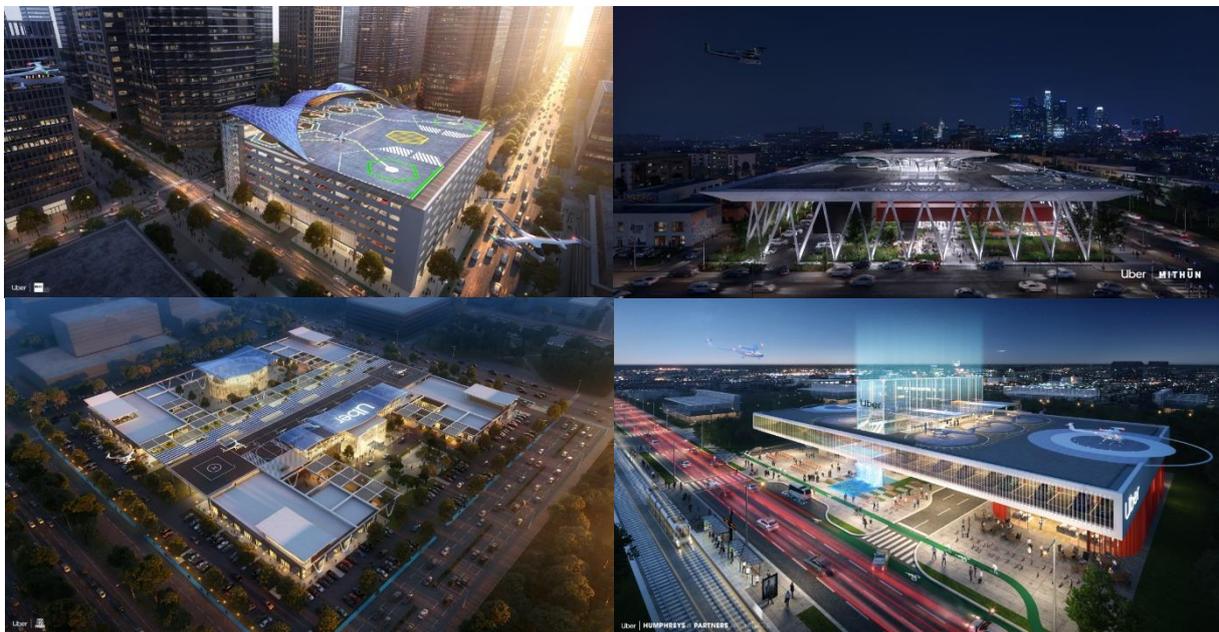


Ilustración 6: Componentes de un módulo de un Uber-Corgan Mega Skyport: la plaza de conexión, la estación, el puente y la cubierta de vuelo. Fuente: Corgan [CORG18]



Ilustración 7: Representación artística del Uber-Corgan Mega Skyport. Fuente: Corgan [CORG18]

Los diferentes "Uber Elevate Summit" anuales son también la ocasión para gabinetes de arquitectura y obras civiles de proponer nuevos conceptos de estaciones de aerotaxis. Entre los últimos proyectos propuestos este año (2019), muchos presentan similitudes, como se puede ver en la Ilustración 8: la instalación en un edificio propio para el servicio, un diseño depurado para cuadrar con la imagen de elevación hacia el aire, una conexión fundamental con otros medios de transporte mediante aparcamientos o paradas de bus/tranvía/metro/tren, diferentes zonas bien conectadas para la acogida y espera de los usuarios, la subida y bajada de los pasajeros, el despegue y aterrizaje de los aerotaxis. Pero todos estos proyectos permanecen de momento fictivos y ninguna fecha de construcción ha sido oficializada.



*Ilustración 8: Representaciones artísticas de proyectos de estaciones de aerotaxis para Uber por cuatro gabinetes de arquitectura: Beck Group, Mithun, BOKA Powell and Humphreys&Partners.
Fuente: Tech Crunch [ROSE19]*

Como mostrado en este segundo capítulo, la industria de los aerotaxis es una industria reciente, innovadora, con un crecimiento considerable, y una comercialización prevista dentro de poco años. Habrá que esperar un poco para que el servicio de aerotaxi sea funcional, dependiendo mucho del grado de cumplimiento de las fases de ensayos, y de la rapidez de obtención de la certificación de operación de los vehículos. Mientras, las infraestructuras para acoger este nuevo medio de transporte todavía no existen, y se quedan en fase de proyectos teóricos de construcción, lo que confirma la motivación del proyecto, que se inscribe perfectamente en las preocupaciones de las empresas de aerotaxis en los años que vienen, cuando venga el momento de implantar físicamente el servicio de transporte. Lilium pertenece a esta generación de empresas nuevas que quieren revolucionar el mundo del transporte con su aeronave eVTOL, y que tiene un potencial muy grande gracias a un modelo de negocio equilibrado y coherente, y a unos resultados parciales alentadores. Actualmente en fase de ensayos, con un primer vuelo exitoso en 2019, el Lilium Jet deberá disponer también de una infraestructura operacional y adaptada para alcanzar el objetivo de tener un servicio funcional en 2025. El diseño de las estaciones será un elemento fundamental en el desarrollo de la actividad, con mayor motivo que hay una concurrencia creciente en el sector, en particular con Uber, empresa mundial que ya revolucionó el mundo de los taxis terrestres y que planea también la implantación de la parte operativa de un servicio de aerotaxi.

Ahora que el estado de la cuestión ha sido aclarado, toca empezar la parte de diseño de la estación de aerotaxis. Por eso, primeramente, hay que tomar en consideración todos los requisitos técnicos de diseño, que vienen por una parte de la regulación sobre las estaciones de aerotaxis, y por otra parte de las especificaciones de la aeronave de Lilium, y es el propósito del capítulo siguiente.

Capítulo 3: Requisitos técnicos de diseño

Para el diseño de una estación de aerotaxis, es fundamental empezar por los requisitos técnicos. Por requisitos técnicos se entiende por una parte todas las normativas que deben cumplir las estaciones para obtener una certificación de operación y por otra parte las características técnicas del Lillium Jet que influyen en el diseño de la estación. En efecto, se recuerda que la metodología elegida para este proyecto es deducir el diseño de la estación de aerotaxis de tres cosas: lo que impone la normativa, lo que propone Lillium y lo que quieren los clientes. Las dos primeras partes, más técnicas, constituyen los dos subcapítulos siguientes, y la tercera constituirá el capítulo siguiente.

3.1. Requisitos por parte de la regulación

3.1.1. Metodología

Como explicado en el apartado "2.2. El modelo de Lillium", la colaboración de las agencias internacionales de regulación de la aviación civil es fundamental para obtener las certificaciones de vuelo de los aerotaxis. Pero las estaciones también deben cumplir con las normativas para obtener el derecho de operar su servicio. La referencia para reglamentos y normativas aeronáuticas es la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI o ICAO en inglés). Como las aeronaves eVTOL son una innovación muy reciente, todavía no existe un reglamento explícito para las estaciones de aerotaxis. La metodología elegida en este caso es coger la normativa sobre helipuertos y discutir algunos puntos que podrían cambiar en el caso de los aerotaxis VTOL. La normativa específica para los helipuertos se encuentra en el Volumen 2 "Helipuertos" del Anexo 14 de la Convención sobre la Aviación Civil Internacional de la OACI [ICAO13].

3.1.2. Definiciones generales previas

Se proveen algunas definiciones generales útiles para los apartados siguientes:

- Hay tres tipos de helipuertos diferentes: los helipuertos de superficie, emplazados en tierra, los helipuertos elevados, emplazados sobre una estructura terrestre elevada y las heliplataformas, plataformas flotantes o fijas situadas en una estructura mar adentro. Existen también helipuertos a bordo, situados en embarcaciones, pero en el caso de un uso para un servicio de aerotaxis, su utilización es muy poco probable. Entonces sólo se consideran los tres principales tipos de helipuertos en lo que sigue. Para no confundir entre la normativa prevista para los helicópteros de la OACI y sus adaptaciones para las aeronaves VTOL, se utilizarán las denominaciones "helipuerto" para los helicópteros y "vertipuerto" para las aeronaves VTOL.
- La mayoría del dimensionado de las diferentes zonas físicas se hace a partir de una dimensión que corresponde al ancho total de la aeronave. Esta dimensión, también llamada "dimensión controladora" será llamada D en lo que sigue. Para el diseño de un vertipuerto, se recomienda elegir como valor de D el máximo entre el ancho total y la longitud total de la aeronave.
- Las aeronaves se dividen en tres clases de performance según su comportamiento en caso de un fallo crítico: 1 cuando la aeronave tiene la capacidad de seguir su vuelo hacia una zona de aterrizaje apropiada; 2 cuando la aeronave tiene la capacidad de seguir su vuelo hacia una zona de aterrizaje apropiada salvo cuando el fallo ocurre pronto en la fase de despegue o tarde en la fase de aterrizaje, caso que requiere un aterrizaje forzoso; 3 cuando la aeronave puede necesitar un aterrizaje forzoso, independientemente de la fase del vuelo.

3.1.3. Dimensiones de las diferentes zonas del vertipuerto

- **Zona de aproximación final y despegue (FATO, Final approach and take-off area en inglés):** Es un área circular o cuadrilátera en la que se realiza la fase final de aproximación de la aeronave (el aterrizaje) y el comienzo de la fase de despegue. Debe ser una zona libre de obstáculos. La dimensión de esta zona debe cumplir:
 - para aeronaves de clase 1, $FATO \geq 1 D$
 - para aeronaves de clase 2 y 3, $FATO \geq 1 D$ cuando el peso máximo de despegue excede

3175kg, y $FATO \geq 0,83 D$ en el caso contrario.

En el caso de heliplataformas (o de "vertiplataformas"), la dimensión de la zona debe cumplir $FATO \geq 1 D$, independientemente de la clase de aeronaves.

Entre otros requisitos, tiene que ser una superficie plana que permite la evacuación del agua, pero con una inclinación máxima de 3% para un helipuerto de superficie y de 2% para un helipuerto elevado. Tiene que ser una superficie libre de irregularidades y resistente al flujo de aire producido por los rotores de las aeronaves.

- **Zona de toma de contacto y elevación inicial (TLOF, Touchdown and lift-off area en inglés):** Es un área circular que toca la aeronave cuando aterriza y despegue. Se sitúa dentro de la FATO. Su dimensión debe cumplir:

- $TLOF \geq 0,83 D$ para helipuertos de superficie;

- $TLOF = FATO$, es decir que las dos zonas coinciden, para helipuertos elevados;

- $TLOF \geq 1 D$ cuando el peso máximo de despegue excede 3175kg y $TLOF \geq 0,83 D$ en el caso contrario, para heliplataformas.

La superficie debe tener las mismas características que la FATO, salvo la inclinación máxima que es de 2%.

- **Área de seguridad (Safety area en inglés):** Es una zona que rodea la FATO que sirve para reducir el riesgo de daño de aeronaves divergiendo accidentalmente de la FATO. El área de seguridad tiene que cubrir una distancia mínima de 3m o 0,25 D a partir de la periferia de la FATO, y un diámetro total mínimo de 2 D (si la FATO es circular; si la FATO es cuadrilátera, el área de seguridad debe tener un ancho mínimo de 2 D en cada lado).

Los esquemas de la Figura 3 permiten visualizar las tres diferentes zonas y sus dimensiones.

A parte de estas tres áreas, tiene que haber una zona inclinada a 45° a partir del borde del área de seguridad hasta una distancia de 10m libre de obstáculos. La única excepción es cuando los obstáculos se sitúan sólo de un lado de la FATO, pueden penetrar esa zona inclinada. Los esquemas de la Figura 4 permiten visualizar esta zona, y diferentes escenarios con obstáculos válidos (V) o no válidos (X).

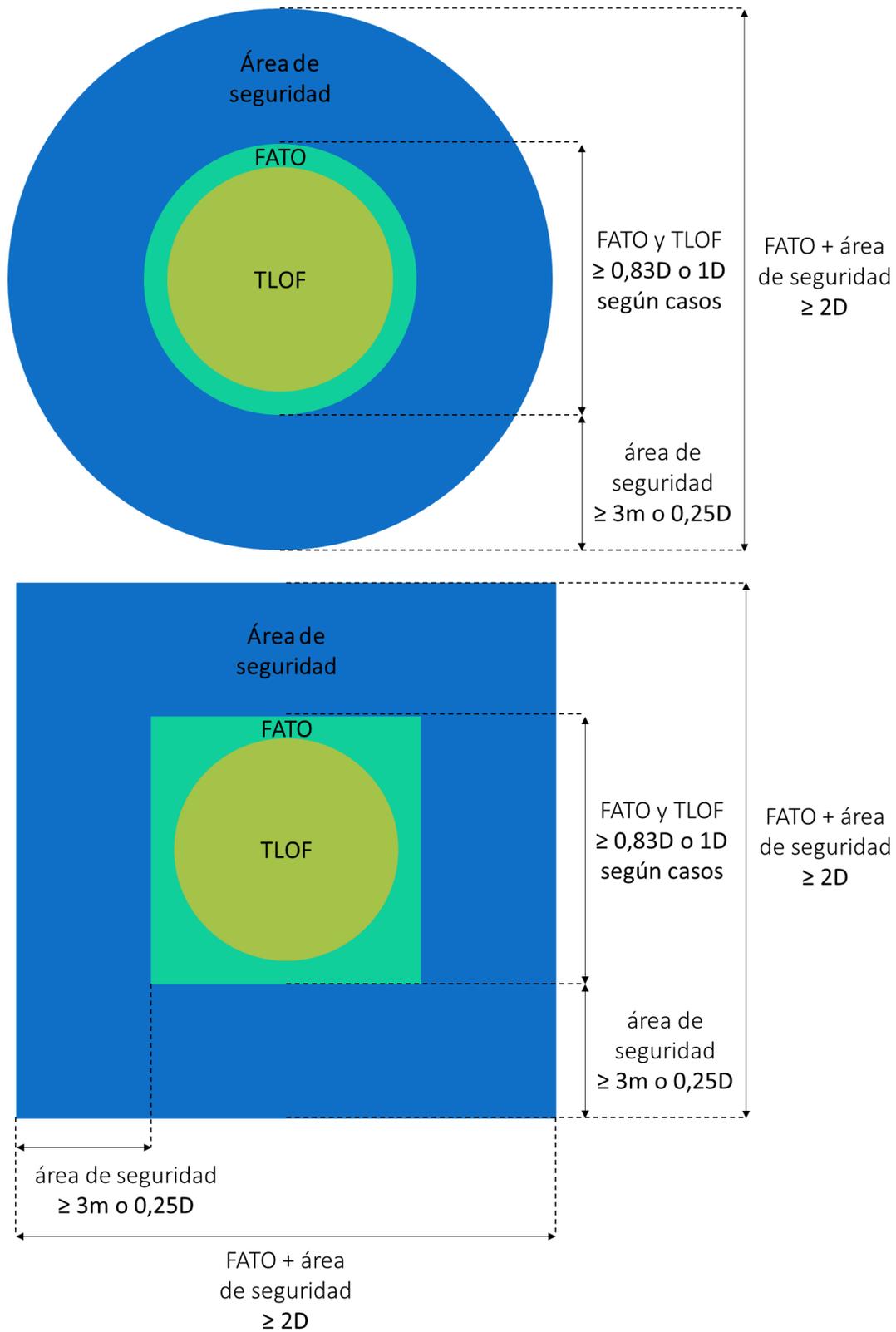


Figura 3: Esquema de las diferentes zonas de un helipuerto y de sus dimensiones, en el caso de zonas circulares y cuadriláteras. Fuente: elaboración propia, 2019

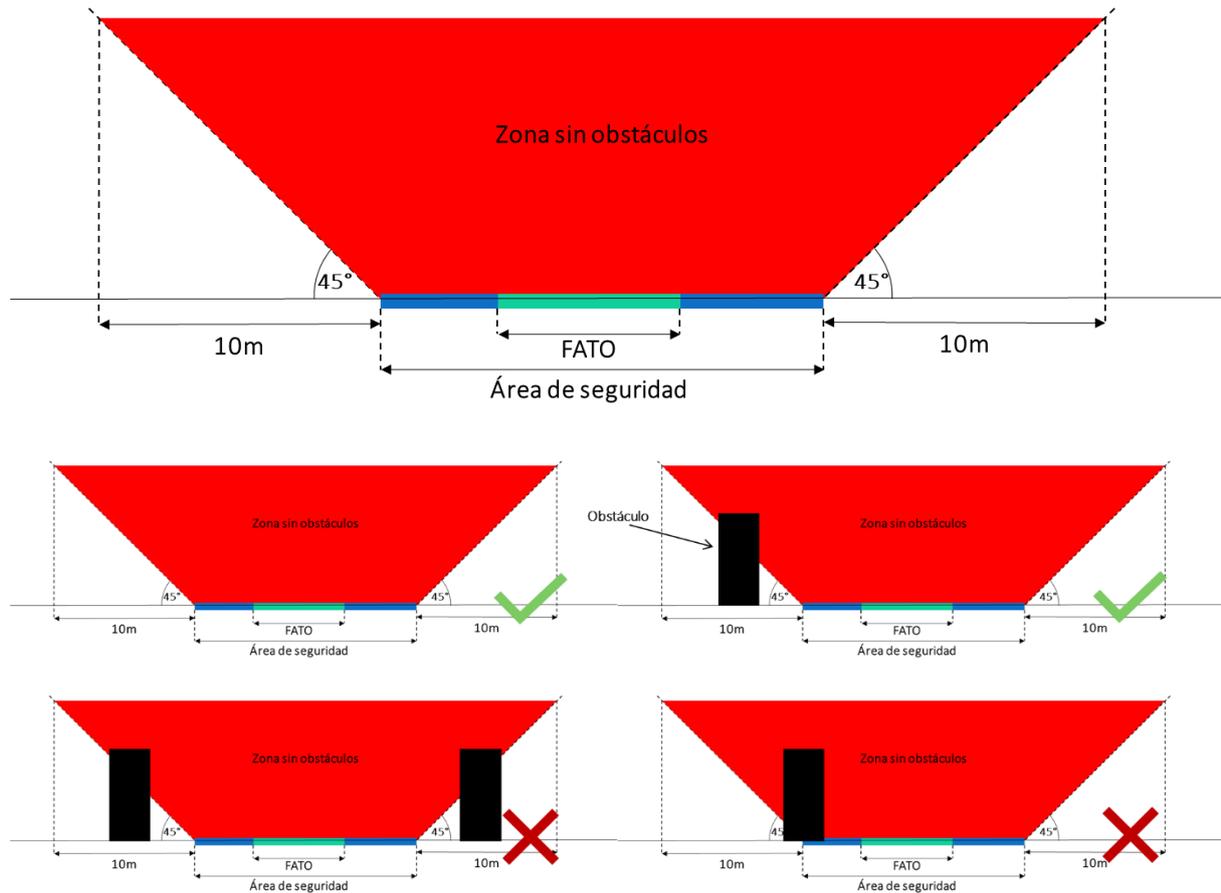


Figura 4: Esquema de la zona sin obstáculos de un helipuerto, y diferentes escenarios con obstáculos válidos o no válidos. Fuente: elaboración propia, 2019

- Pistas y rutas de rodaje terrestre y aéreo:** La pista de rodaje es un camino definido para que la aeronave pueda deslizarse entre la zona de despegue y aterrizaje y la zona de aparcamiento. Cuando la aeronave se desplaza sobre ruedas en el suelo, es una pista de rodaje terrestre, y cuando vuela a baja altitud y velocidad, es una pista de rodaje aéreo. La pista de rodaje está al centro de una ruta de rodaje, más ancha, que incluye una zona de seguridad. Las dimensiones mínimas del ancho de las pistas y rutas de rodaje terrestre y aéreo se muestran a continuación, en la Figura 5. La distancia UCW (por UnderCarriage Width) se refiere al ancho del tren de aterrizaje de la aeronave. Cuando una FATO se sitúa cerca de una pista de rodaje, y cuando se prevé operaciones simultáneas en las dos zonas, la distancia mínima de separación entre el borde de la FATO y el borde de la pista de rodaje debe ser de 60m para aeronaves de menos de 3175kg. La ruta de rodaje debe ser libre de

obstáculos fijos, pero los objetos móviles son permitidos cuando no hay movimientos de aeronaves. En el caso de la presencia de varias rutas de rodaje, no se pueden superponerse si se prevé operaciones simultáneas.

Tipo de rodaje	Zona	Ancho mínimo	
		Helipuertos de superficie	Helipuertos elevados
Terrestre	Pista	1,5 UCW	2 UCW
	Ruta	1,5 D	2 D
Aéreo	Pista	2 UCW	3 UCW
	Ruta	2 D	2 D

Figura 5: Anchos mínimos de pistas y rutas de rodaje terrestre y aéreo. Fuente: elaboración propia en 2019 a partir de la normativa de la OACI [ICAO13]

- **Zona de rampa o estacionamiento:** La zona de rampa es una zona para el estacionamiento y las operaciones terrestres sobre la aeronave (cargas y descargas). La zona de estacionamiento incluye una parte central que debe contener un círculo de diámetro mínimo 1,2 D y una zona de protección de 0,4 D de ancho a partir del borde de la zona central, es decir de un diámetro mínimo de 2 D. Para operaciones simultáneas, las zonas de protección de los estacionamientos y las rutas de rodaje correspondientes no deben superponerse, pero es posible sin operaciones simultáneas.

Dado los criterios utilizados para diseñar estas diferentes zonas para los helipuertos, no se considera necesaria una adaptación de la normativa para los vertipuertos en este caso.

3.1.4. Obstáculos

Para garantizar la seguridad de las operaciones de las aeronaves cerca de los helipuertos y vertipuertos, se definen dos superficies, la superficie de subida de despegue y la superficie de acercamiento, que deben ser libre de obstáculos. Un helipuerto debe tener por lo menos una superficie de subida de despegue y una superficie de acercamiento, pero se recomienda tener dos de cada una para adaptarse más fácilmente a las condiciones de viento.

La superficie de subida de despegue y la superficie de acercamiento tienen las mismas dimensiones. Son superficies inclinadas cuyos límites son los siguientes:

- el borde interior corresponde al borde exterior del área de seguridad y debe tener la misma longitud (como mínimo);
- los bordes laterales comienzan a las extremidades del borde interior y divergen con una inclinación de 10% en caso de operaciones diurnas (respectivamente 15% para operaciones nocturnas) hasta que el ancho de la superficie alcance 7 D (respectivamente 10 D para operaciones nocturnas);
- el borde exterior corresponde a la distancia a partir de la cual la cuesta alcance 152m por encima de la altitud de la FATO.

La Figura 6 a continuación permite visualizar la superficie. Se representa recta, pero se puede también incluir una curva. Para aeronaves de clase de performance 1, se recomienda una inclinación de la superficie de 4,5% (lo que da una distancia total de 3386m).

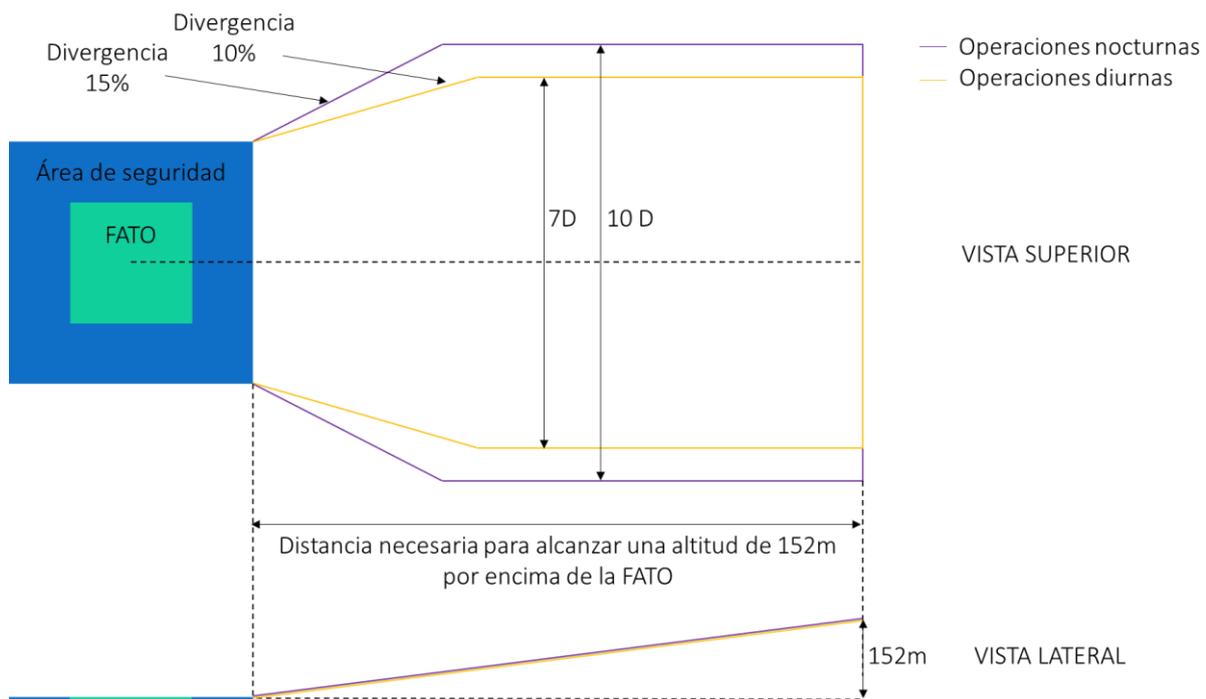


Figura 6: Dimensiones de una superficie de subida de despegue o de acercamiento. Fuente: elaboración propia, 2019

Existen también áreas de transición entre las superficies de subida de despegue y de acercamiento. Son áreas que tienen un ancho de 45m y una inclinación de 50%. Se pueden visualizar en la Figura 7 a continuación.

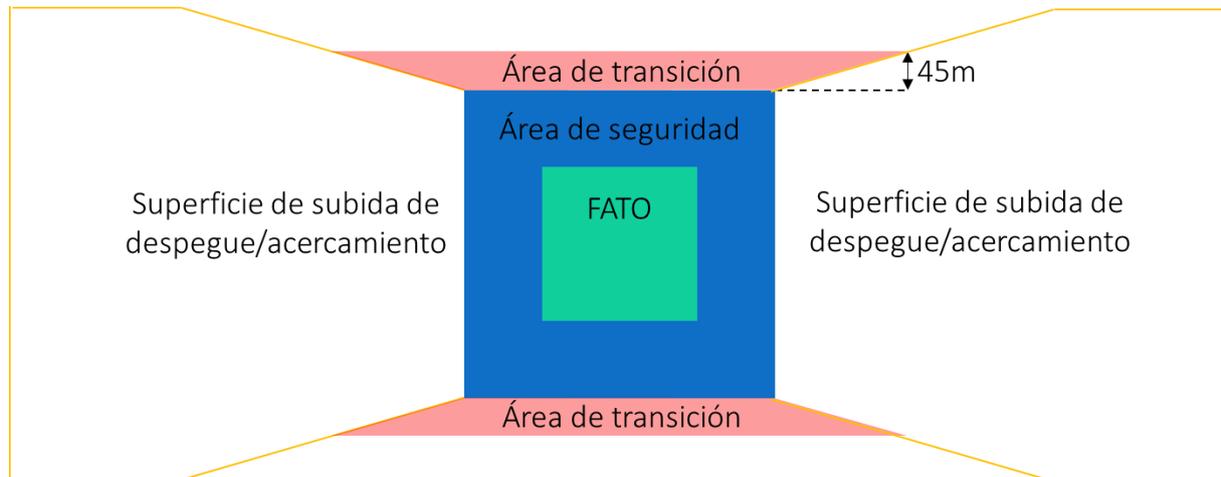


Figura 7: Posición y dimensiones de las áreas de transición. Fuente: elaboración propia, 2019

Como estas superficies han sido elaboradas a partir de la manera de volar de los helicópteros, diferente de los aerotaxis eVTOL, sus dimensiones podrían variar en el futuro, adaptando la normativa. Mientras, en ausencia de más información, se consideran idénticas.

3.1.5. Ayudas visuales

Un helipuerto, y por extensión un vertipuerto, debe disponer de varias ayudas visuales:

- Por lo menos, uno indicador de dirección del viento, dispuesto de tal manera que no le afecten las perturbaciones aéreas provocados por las aeronaves. Sus dimensiones para un helipuerto de superficie tienen que ser 2,4m de longitud, 0,3m de diámetro en el extremo pequeño y 0,6m de diámetro en el extremo grande. Para un helipuerto elevado, hay que dividir por dos todas las dimensiones.
- Una marca de identificación del helipuerto, en el centro de la FATO. Consiste en una letra H de color blanco, a excepción de los helipuertos hospitalarios, de color rojo en una cruz blanca. Las dimensiones mínimas del H son 3m de largo, 1,8m de ancho y 0,4m de espesor de la letra.

- Una indicación del peso máximo admisible, en toneladas, situada en la FATO o TLOF y visible desde la dirección preferida de acercamiento. La forma y proporción de las cifras y letras se muestran en la Figura 8 para FATO de dimensión superior a 30m. Para FATO de dimensión entre 15 y 30m, el tamaño mínimo de las letras y cifras tiene que ser 90cm, y 60cm para FATO de dimensión inferior a 15m (conservando las mismas proporciones).

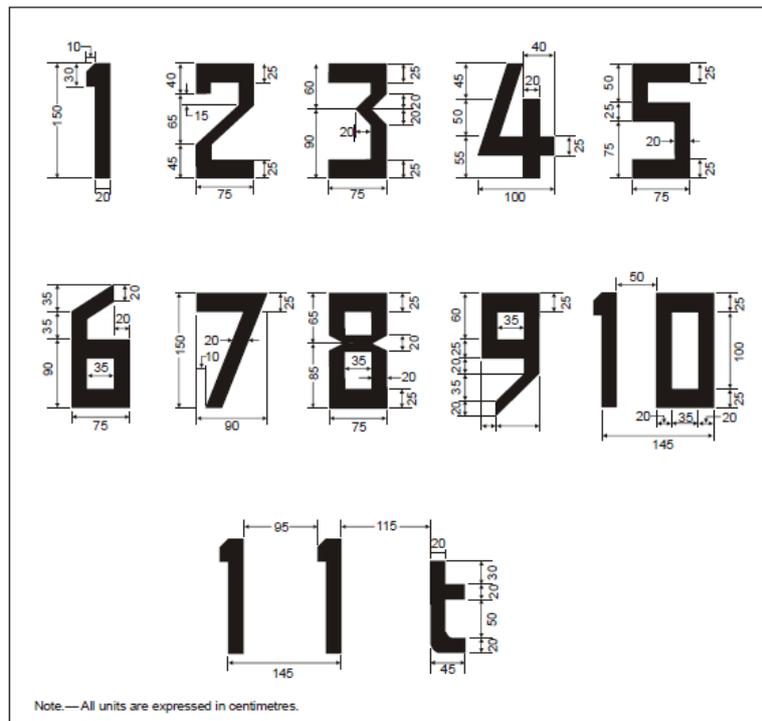


Figura 8: Forma y proporciones de las diferentes cifras y letras. Fuente: OACI [ICAO13]

- Una marca blanca con líneas punteadas del perímetro de la FATO para helipuertos elevados. Cada marca debe ser de 30cm de ancho y 1,5m de longitud, y deben ser espaciadas de una longitud entre 1,5m y 2m. Las esquinas deben ser también señalizadas.
- Unas marcas de posicionamiento para un estacionamiento. Consiste en una línea circular amarilla de diámetro 0,5 D y de ancho mínimo 0,5m, y dos líneas circulares amarillas de ancho mínimo 15cm y de diámetros respectivos 0,83 D y 1,2 D.
- Una marca del nombre del helipuerto, tal como utilizado para las comunicaciones radio. Cada letra debe tener un tamaño superior a 1,5m para helipuertos de superficie y 1,2m para helipuertos elevados.
- Una marca de las pistas de rodaje (las rutas de rodaje no necesitan ser marcadas).

Consiste en una línea central amarilla de ancho 15cm y una línea doble amarilla de ancho 2x15cm para cada borde.

- En caso de utilización nocturna, cada marca debe ser iluminada o retrorreflectante.
- Se recomienda también el uso de una baliza luminosa para facilitar la identificación del helipuerto a distancia (como un faro). La baliza debe situarse en punto elevado y emitir flashes luminosos.

3.2. Requisitos por parte del Lilium Jet

El objetivo del proyecto es proponer un diseño de una estación de aerotaxis adaptada para el Lilium Jet. Por eso, es importante no sólo recoger los requisitos por parte de los reglamentos como en el apartado anterior, sino también las características técnicas de la aeronave diseñada por Lilium. Como el Lilium Jet todavía no está en fase de comercialización, las informaciones técnicas son incompletas. La metodología utilizada en este apartado ha sido recoger todas las informaciones disponibles de manera pública y completarlas utilizando deducciones o hipótesis.

3.2.1. Apariencia general del Lilium Jet

Para diseñar la apariencia del Lilium Jet, el criterio principal era su simplicidad, pero garantizando una eficiencia aerodinámica, y una estética de acuerdo con una experiencia excepcional del usuario. Por eso, han utilizado principios de biomimetismo, inspirándose de las mantarrayas [LILI19_2].

Como se puede ver en la Ilustración 9, el Lilium Jet incluye dos pares de alas fijas: una ala principal en la parte trasera, y una más pequeña tipo "canard" en la parte delantera. Tiene una capacidad de 5 personas (4 pasajeros y un piloto) y su tren de aterrizaje consta de tres ruedas dispuestas en triángulo.



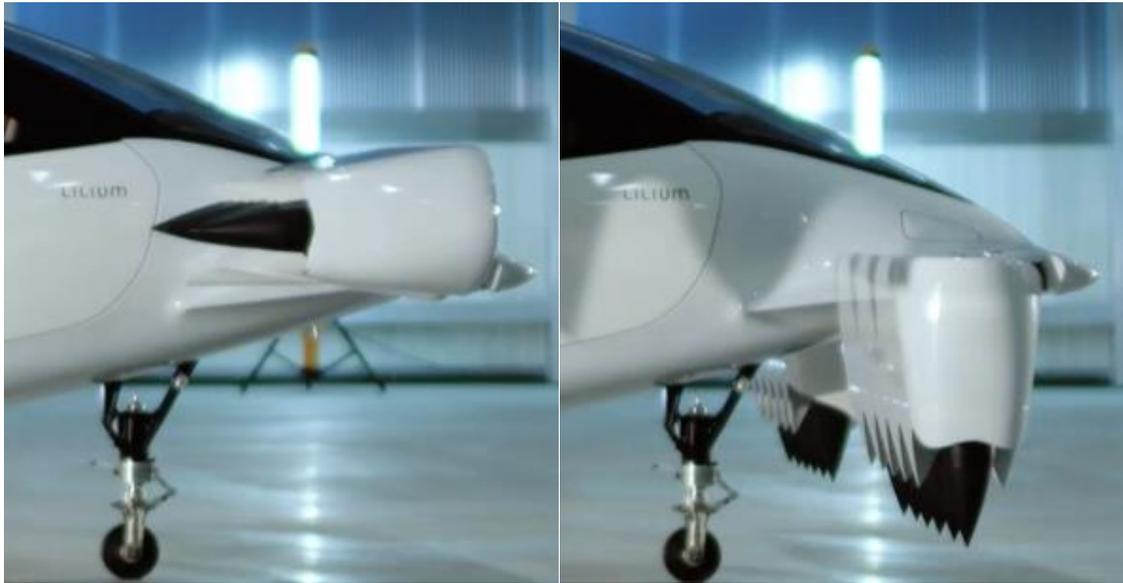
Ilustración 9: Vistas superior y lateral del Lilium Jet. Fuente: Lilium [LILI19]

Cada ala principal tiene 4 flaps y cada ala "canard" tiene 2 flaps, por un total de 12 flaps, que pueden mover todos de manera independiente. La elección de esta configuración "canard" se puede explicar por varios argumentos:

- una ala única se situaría en el centro de la aeronave, lo que complicaría el acceso para los pasajeros y el piloto;
- con una ala única, se necesitaría una parte trasera más larga para mantener la estabilidad del vehículo, lo que añadiría peso y disminuiría la manejabilidad al suelo de la aeronave;
- tener dos alas incluido una más pequeña tipo "canard" permite generar más sustentación y controlar la aeronave de manera más eficiente, sin necesidad de una cola larga o de alerones para asegurar su estabilidad.

Los árboles propulsores no son hélices libres como las de los helicópteros, sino ventiladores con conductos ("ducted fans" en inglés). Cada flap contiene 3 ventiladores con conductos, por un total de 36 por aeronave. Cada ventilador es conectado a su propio motor eléctrico, todos independientes. La manera de volar de este aerotaxi se llama "vectorización de la tracción", es decir que los cambios de dirección no se realizan mediante movimientos de alerones, sino directamente cambiando el ángulo de la tracción generada como en un cohete. Es este cambio de ángulo que permite al aerotaxi moverse verticalmente y horizontalmente, como en la Ilustración 10 a continuación [LILI19_3].

Las ventajas de tener 36 ventiladores con conductos todos independientes son de mejorar su eficiencia, su manejabilidad y también su seguridad. En efecto, como se puede adaptar rápidamente (en un décimo de segundo) la revolución de cada motor, se obtiene trayectorias más lisas, especialmente en la fase de transición entre el despegue o aterrizaje vertical y el vuelo horizontal. Además, como se utilizan más motores, cada uno tiene una potencia menor, y entonces el tiempo necesario para alcanzar la potencia máxima o la potencia mínima es mucho menor (menos que un segundo) que para una aeronave con menos motores. Y por fin, a nivel de seguridad, la presencia de 36 motores independientes está de acuerdo con principios de redundancia. En un helicóptero con un solo rotor, si el rotor falla, la aeronave se encuentra en una situación crítica. Con 36 motores, la seguridad de la aeronave es más garantizada en caso de fallo de uno o varios motores.



*Ilustración 10: Cambio de posición horizontal a vertical de los ventiladores de la ala delantera.
Fuente: Lilium [LILI19]*

3.2.2. Dimensiones

Las dimensiones exactas del Lilium Jet no son conocidas. Pero Lilium ha indicado que la envergadura de su Jet era de 11m aproximadamente [LILI19_3]. Se coge esta distancia como hipótesis de cálculo, y partir del estudio de varios bocetos y fotografías disponible en el sitio Web de Lilium, se han estimado las dimensiones del Lilium Jet, agrupadas en la tabla de la Figura 9 siguiente, y representadas en la Figura 10 a continuación.

Envergadura total	11m
Longitud total	4,7m
Ancho de la cabina	1,7m
Longitud de la cabina	3,0m
Envergadura de la ala "canard"	4,4m
Altura	1,5m
Longitud del tren de aterrizaje	2,5m
Ancho del tren de aterrizaje	2,0m

Figura 9: Tabla de dimensiones del Lilium Jet. Fuente: elaboración propia, 2019

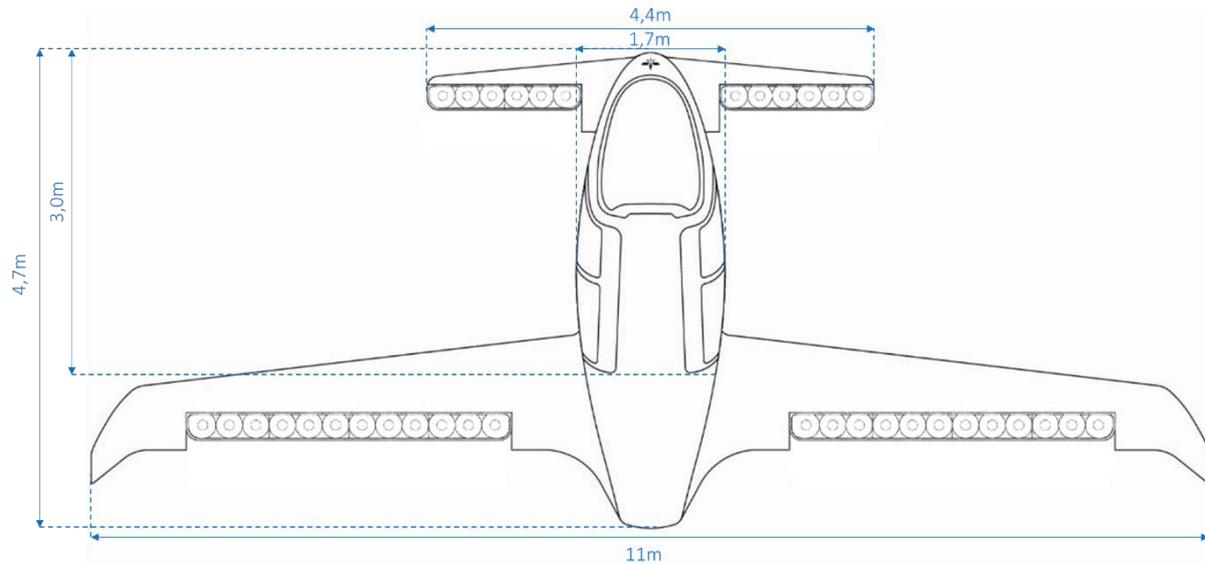


Figura 10: Representación de las dimensiones del Lilium Jet. Fuente: elaboración propia, 2019

3.2.3. Peso

No hay ninguna información oficial sobre el peso del Lilium Jet. En 2017, la primera versión "Eagle", más pequeña, que tenía una capacidad de 2 pasajeros, tenía un peso en vacío de 440kg y una carga útil de 200kg [EVTO19]. Extrapolando el valor de la carga útil para 5 pasajeros, debería ser aproximadamente de 500kg. Un estudio del departamento de ingeniería mecánica y aeroespacial de la Universidad Politécnica de Torino [BACC19] evaluó a partir de un modelo matemático el peso del Lilium Jet, y sería de 1700kg incluyendo 900kg de batería.

En ausencia de más información, se coge como valores para el Lilium Jet un peso total en vacío de 1700kg, 900kg de batería y una carga útil de 500kg.

3.2.4. Eficiencia energética y carga de baterías

A nivel energético, el Lilium Jet debería tener una eficiencia muy competitiva en comparación con helicópteros y otros aerotaxis, por dos motivos.

El primer motivo es que el tipo de propulsión con "tracción vectorizada" permite optimizar el rendimiento de los motores en vuelo horizontal. Con una rápida análisis de las fuerzas mecánicas, el rendimiento mecánico es automáticamente mejor cuando la dirección de la

tracción está en el mismo sentido que la trayectoria, lo que no ocurre en caso de tener hélices horizontales como en un helicóptero o un multicóptero.

El segundo motivo es que, en vez de utilizar de manera exclusiva la fuerza de sustentación obtenida por la rotación de hélices, la presencia de alas fijas en la aeronave genera automáticamente una sustentación que reduce la energía consumida para el vuelo horizontal. En efecto, Lillium afirma que, con la sustentación generada por las alas, los motores sólo necesitan estar a los 10% de su potencia máxima para mantener una velocidad alta de su Jet [LILI19_3].

Gracias a este nivel de eficiencia energética, Lillium afirma que puede utilizar baterías eléctricas ya disponibles para la venta [LILI19_3], y que la batería de su aerotaxi es "comparable con la batería de uno de los coches eléctricos más grandes existentes" según su director comercial Remo Gerber [TEDX19, 6:55]. En este caso, es la empresa Tesla que produce actualmente los coches eléctricos con las más potentes baterías, para sus modelos S100D y X100D. Son coches que tienen una batería de 100kWh y que pesan aproximadamente 600kg, y que tienen entonces una eficiencia de 166 Wh/kg [TESL16]. Cogiendo el valor del peso de la batería del aerotaxi en el apartado anterior, es decir 900kg, con la misma eficiencia, se obtiene una batería de aproximadamente 150kWh para el Lillium Jet. Este valor podría variar mucho según los avances tecnológicos, dado que hay muchas inversiones en este ámbito, en particular del Ministerio de Energía de Estados Unidos, para alcanzar una eficiencia de 500Wh/kg en los próximos años [OTT_16].

La similitud de las baterías del Lillium Jet y de los últimos coches de Tesla nos permite también hacer hipótesis sobre el tiempo de recarga de las baterías. Los cargadores tradicionales de Tesla permiten una recarga total en 7h aproximadamente, y los nuevos "Superchargers" necesitan sólo 42 minutos para cargar desde el 10% hasta el 80% de la batería [EVDA19].

Teniendo en cuenta la autonomía limitada de los aerotaxis y el tiempo previsto de recarga, la presencia de cargadores rápidos directamente en las estaciones de aerotaxis es imprescindible.

Se puede también considerar otra solución para la autonomía de las baterías, que sería un cambio in situ de las baterías eléctricas, o "battery-swapping" para disminuir el tiempo de no utilización. No se dispone de informaciones suficientes para determinar si el Lilium Jet permite el battery-swapping, pero la Ilustración 11, extraída del sitio Web de Lilium, deja pensar que existe un acceso directo a las baterías de la aeronave.

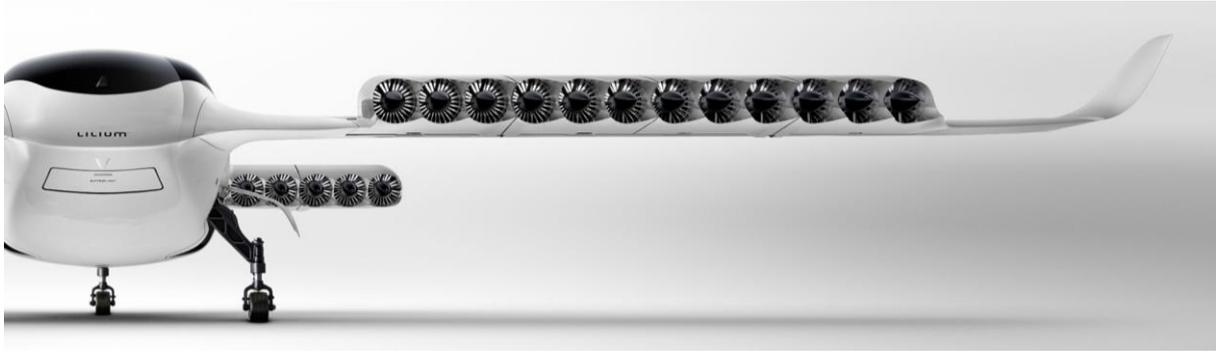


Ilustración 11: Vista de detrás del Lilium Jet. Fuente: Lilium [LILI19]

3.2.5. Mantenimiento

El aerotaxi de Lilium, como cualquiera aeronave, necesita someterse a tareas de mantenimiento para garantizar su seguridad y su buen funcionamiento. Las actividades de mantenimiento de las aeronaves son controladas para respetar las normativas vigentes, en España por Aviación Civil Española, y existe planificaciones estándares de revisiones de mantenimiento.

Hay tres tipos de mantenimiento para las aeronaves [VUEL13]:

- el mantenimiento en línea: Consiste en inspecciones efectuadas por el operador directamente, es decir empleados de Lilium, y sin necesitar una parada larga de la aeronave en un hangar. Incluye el mantenimiento de tránsito (inspección rápida antes de cada vuelo para comprobar el estado general del avión), la revisión diaria (inspección antes del primer vuelo del día), y la revisión S (inspección cada cien horas de vuelo para comprobar todos los aspectos de seguridad de la aeronave);

- el mantenimiento menor: Consiste en una serie de revisiones de diferentes intensidades y frecuencias, determinadas por tres letras A, B y C, la revisión A siendo la más frecuente y rápida, y la revisión C la más compleja y extensa. Se realizan normalmente en hangares de mantenimiento con un personal dedicado únicamente a tareas de mantenimiento.

- el mantenimiento mayor: Es la revisión más compleja y minuciosa por la que tienen que pasar todas las aeronaves. Para un avión tradicional, requiere 60 000 horas de actividad y puede tardar un mes y medio. Se realizan también en hangares específicos.

El "poder de simplicidad" puesto de relieve por Lilium, que tiene un vehículo "sin cola, sin timón, sin hélices de paso variable, sin hélices plegables, sin caja de cambios, sin circuitos de aceite y una única parte móvil en el motor" [LILI19], es una ventaja para reducir el tiempo y el coste de mantenimiento, muy exigente para aeronaves.

Entonces, como mostrado en este capítulo, a pesar de la ausencia de informaciones directas, que sean sobre las normativas de construcción de las estaciones de aerotaxis, o sobre las especificaciones del Lilium Jet, se ha podido deducir varios criterios que permitirán proponer en el Capítulo 5 un dimensionado y un diseño de una estación de aerotaxis que sea compatible con la regulación y adaptado al Lilium Jet. Para completar los diferentes requisitos del diseño de la estación, es también imprescindible tomar en consideración lo que quieren los clientes potenciales a los que se dedican este servicio. Por eso, el proceso de diseño incluye una parte de identificación de los perfiles y de las necesidades de los clientes, que constituye el capítulo siguiente.

Capítulo 4: Perfiles y necesidades cliente

Este capítulo se dedica al estudio de los diferentes perfiles y necesidades de los clientes potenciales del servicio de aerotaxi propuesto por Liliium. Es una parte fundamental en el proceso de diseño de una estación de aerotaxis para Liliium porque el resultado propuesto debe ser el punto de encuentro entre por una parte el cumplimiento de las normativas y la adaptación al Jet de Liliium, analizados en el capítulo anterior, y por otra parte la demanda existente o latente para este servicio. Sin proponer un servicio conveniente y adaptado a su clientela, el modelo de Liliium se encuentra totalmente desequilibrado. Y como las infraestructuras, en este caso las estaciones, forman parte integral del servicio de aerotaxi propuesto, es fundamental comprender las necesidades cliente para incluirlas en el diseño de las estaciones. En un primer apartado, se identifican los diferentes segmentos y perfiles de clientes de Liliium. Luego, en un segundo apartado, se analizan las variaciones potenciales de la demanda. Por último, en un tercer apartado, se deducen del estudio los criterios de calidad del servicio más importantes en el diseño de las estaciones de aerotaxis.

4.1. Segmentos y perfiles de clientes

Conforme a la visión de Liliium, el servicio de aerotaxi es a priori para todos los segmentos de clientes. Pero como para la mayoría de los productos y servicios, es el segmento poblacional de 18 a 24 años el más influyente. Corresponde actualmente a lo que se llama la "generación Z", por haber nacido después de las generaciones X y Y, entre 1994 y 2010. No solamente es la generación que más influye en las decisiones de las demás, sino también representa una proporción de la población importante: 25,9% de la población mundial [VERD15]. Es una generación marcada por la recesión, las políticas de austeridad y los cambios climáticos. Por eso buscan modos de consumación más altruistas, solidarios y respetuosos del medioambiente. La generación Y o "millennials", que representa ahora la franja 25-35 años, es también un segmento fundamental porque representará en 2025 el 75% de la fuerza laboral del mundo [VERD15]. Aunque las generaciones restantes representan una parte importante de la población, intervienen menos en las tomas de decisiones y siguen las generaciones Y y Z.

En cuanto a los tipos de clientes potenciales del servicio, se puede identificar 4 perfiles diferentes de clientes:

- **El residente comunitario:**

El residente comunitario vive en periferia de los centros urbanos y utiliza el transporte como un medio de conexión social. Pasa mucho tiempo en su barrio, pero utiliza frecuentemente un medio de transporte para irse al centro, en particular para actividades culturales (exposiciones de arte, conciertos, bares, restaurantes etc.) y deportivas. En efecto, prefiere vivir en periferia de los centros urbanos (por motivos de tranquilidad, de calidad de vida o financieros). Busca un medio de transporte más conveniente y disponible para sustituir a los buses y los trenes de cercanías. Tiene vínculos emocionales con su barrio y le interesa mucho los proyectos que pueden crear más dinamismo y más atraktividad.

- **El trabajador pendular:**

El trabajador pendular busca alternativas de transporte para perder menos tiempo por las carreteras y en los atascos. Se trata de un transporte cotidiano, principalmente entre el lugar de trabajo y el lugar de residencia, que realiza actualmente en coche o en taxi. En coherencia con su ritmo de vida, muy ocupado, productivo y rápido, sus preocupaciones principales para el transporte son la puntualidad, la rapidez y la accesibilidad, para ahorrar cada minuto posible. La implantación física del medio de transporte tiene que ser muy estratégica, es decir directamente en los distritos comerciales y las zonas residenciales, o con una conexión rápida con otros medios de transporte para los últimos kilómetros. Le puede interesar servicios adicionales que están en adecuación con su modo de vida: café y comida para llevar, periódicos y conexión wifi en todo momento. Otro uso menos frecuente sería para sustituir a los trenes y aviones de corto recorrido durante viajes profesionales.

- **El turista urbano:**

El turista urbano busca un medio de transporte para descubrir la ciudad como sus habitantes. Tiene un tiempo limitado y utiliza mucho el metro o los buses turísticos para ver el máximo número de lugares emblemáticos de la ciudad. A él le interesan las conexiones intraurbanas entre puntos de interés cultural, y también una conexión rápida entre el centro urbano y los aeropuertos. Busca experiencias innovadoras y maneras insólitas de visitar y descubrir una

ciudad o una región. En efecto, más que la rapidez y la puntualidad, es realmente la experiencia del usuario que tiene que ser al centro de las preocupaciones: vistas panorámicas que el turista podría compartir en redes sociales, una atención personalizada al cliente y una estética cuidada de las infraestructuras.

- **El explorador ocasional:**

El explorador ocasional no es un usuario regular del servicio, y sólo busca un medio de transporte conveniente para ocasiones especiales, como un viaje que necesita irse al aeropuerto o a una estación de trenes, un concierto, un evento deportivo, etc. En general, este tipo de usuario viaja en grupo, y en caso de eventos importantes provoca picos de demanda. Por eso sus preocupaciones principales son la puntualidad y la reactividad del servicio, con una buena gestión del tiempo de espera. El explorador ocasional busca también alternativas a los trenes, los coches compartidos y los coches de alquiler para descubrir nuevas aventuras fuera de los entornos urbanos y realizar excursiones en el campo o en ciudades de tamaño medio. En este caso, el usuario valora más la densidad de la red de estaciones que la rapidez y la puntualidad del servicio.

4.2. Variaciones de la demanda

Evaluar la demanda exacta de un servicio de transporte muy diferente de los actualmente disponibles, con una diversidad de usos posibles para sustituir medios de transporte preexistentes, que todavía no existe y depende mucho de la adopción por el público, sin realizar una encuesta que supere el ámbito de un proyecto de fin de máster, daría unos resultados muy aproximativos y poco aprovechables. No obstante, se puede evaluar las variaciones de la demanda a diferentes escalas: diaria, semanal y anual.

Para evaluar las variaciones de la demanda a escala diaria y semanal, se puede coger como hipótesis que los diferentes usos del servicio de aerotaxis corresponden efectivamente con los perfiles de clientes descritos en el apartado anterior. En este caso, los usos principales que van a generar más demanda son conectados a dos tipos de actividad: la actividad laboral y el tiempo de ocio y vida social. Un estudio sobre el empleo del tiempo del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, realizado en 2009-2010 [IEST10], permite obtener más informaciones sobre el horario dedicado a estas actividades. En efecto, un tratamiento de los resultados del estudio ha permitido la realización de la Figura 11 a continuación, que consiste en un gráfico presentando el porcentaje de personas realizando la misma actividad principal en el mismo momento del día. Se ha elegido representar sólo las tres actividades pertinentes en este caso: "trabajo remunerado", "vida social y diversión" y "transporte".

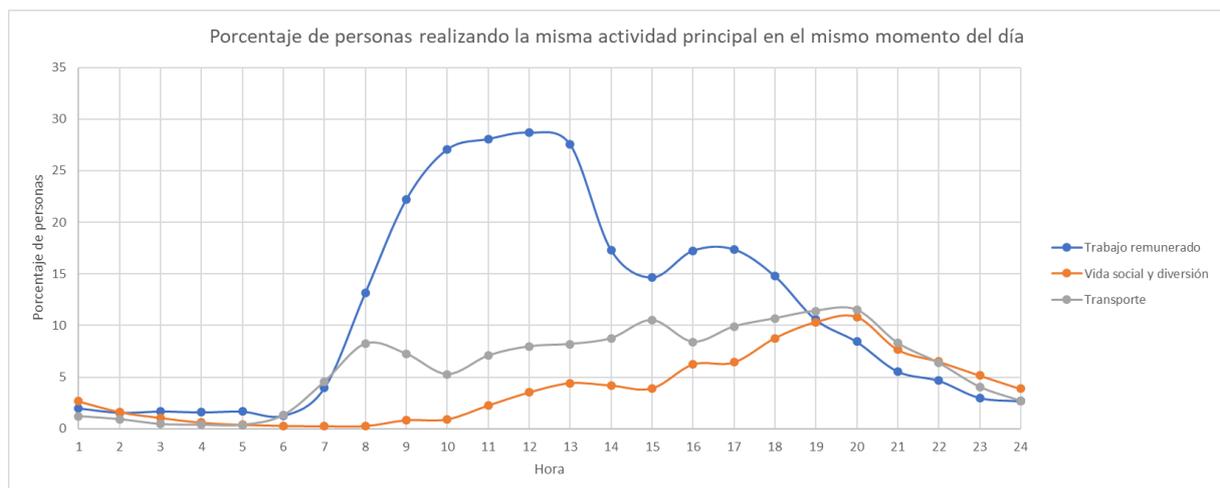


Figura 11: Porcentaje de personas realizando la misma actividad principal en el mismo momento del día. Fuente: elaboración propia en 2019 a partir de un estudio del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, 2009-2010 [IEST10]

Se constata que, para la actividad laboral, hay dos picos diarios, entre las 8:00 y las 14:00, y entre las 16:00 y las 19:00. En cuanto al periodo de vida social y diversión, presenta un pico sobre las 20:00, pero se extiende en el fin de la mañana, la tarde y el atardecer, entre las 11:00 y las 24:00. Eso corresponde con las variaciones del porcentaje de personas en los transportes: los tres picos 7:00-9:00, 14:00-16:00 y 19:00-20:00 son coherentes con el inicio y el fin de los periodos de actividad laboral, y los valores medios (más de 8%) corresponden con la actividad de vida social y diversión. Extrapolando estos resultados al servicio de aerotaxi, se obtiene una variación diaria de la demanda presentada en la Figura 12, con tres picos de demanda alta 7:00-9:00/14:00-16:00/19:00-21:00 que interrumpen una actividad baja entre la 1:00 y las 11:00 y una actividad media entre las 11:00 y las 24:00. Para la variación semanal, de acuerdo con la actividad laboral, la demanda es tal como descrita en la Figura 12 de lunes a viernes, y los tres picos de alta demanda desaparecen durante el fin de semana.

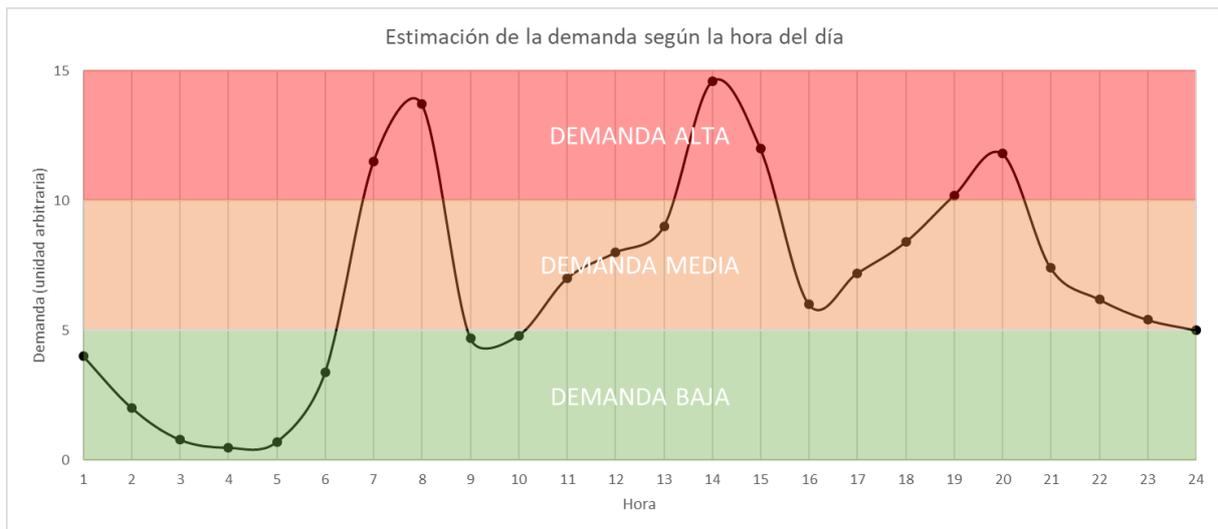


Figura 12: Estimación de la variación diaria de la demanda del servicio de aerotaxi. Fuente: elaboración propia, 2019

Para evaluar la variación de la demanda del servicio a escala anual y analizar la presencia de tendencias estacionales, se emite la hipótesis que la variación es similar a la de los otros medios de transporte urbano. En un estudio del Instituto Nacional de Estadística de España [INE_19], cuyos resultados se muestran en la Figura 13 a continuación, se nota que el número de viajeros que utilizan el metro o el autobús en Madrid es estable durante el año, salvo durante el periodo julio-agosto donde se observa una disminución que puede alcanzar el 50% del valor máximo observado durante el resto del año, debida al periodo de vacaciones estivales. Entonces se espera la misma variación anual para el servicio de aerotaxi, es decir globalmente estable durante el año, con la excepción del periodo estival donde la demanda puede bajar hasta un 50% de lo habitual en el resto del año.

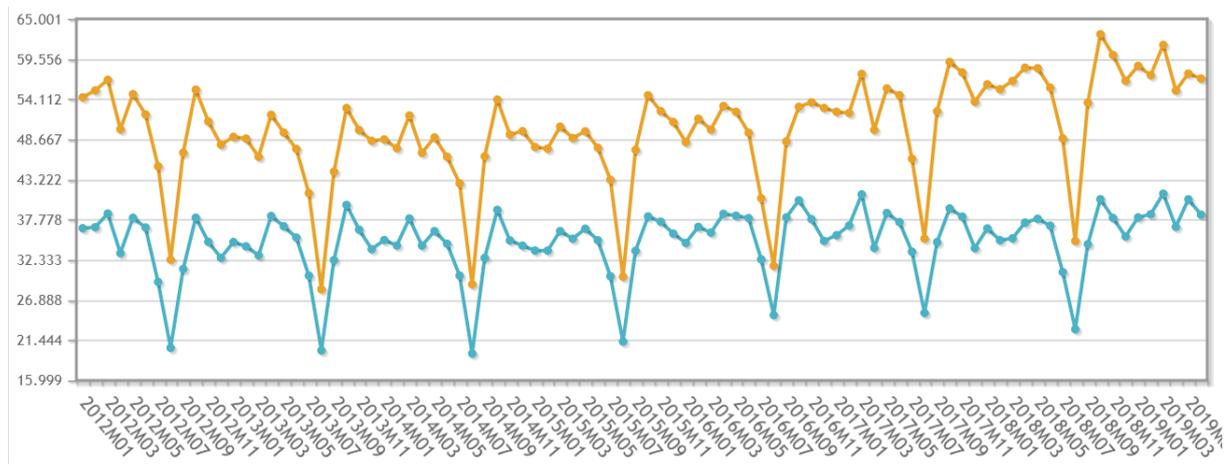


Figura 13: Número de viajeros (unidad: miles de personas) mensuales en transporte urbano en Madrid: en naranja los usuarios del metro y en azul los usuarios de los autobuses. Fuente: Instituto Nacional de Estadística [INE_19]

4.3. Criterios de calidad del servicio

El estudio de los diferentes perfiles de cliente permite emitir varias afirmaciones sobre los criterios que van a influir en la calidad del servicio de aerotaxi. Algunos criterios pueden depender únicamente de la parte aérea del servicio (es decir del vehículo), como la comodidad durante el vuelo, únicamente de la parte terrestre del servicio (es decir de la estación), como la implantación geográfica de las estaciones, o de una combinación de los dos. Conforma a los objetivos del proyecto, este apartado se limita a los criterios de calidad del servicio en los que puede influir el diseño de las estaciones.

- **La implantación geográfica:**

La implantación geográfica de las estaciones de aerotaxi es un punto clave para la calidad del servicio, porque determina el tiempo total de transporte de un viajero, no sólo durante el trayecto en aerotaxi sino también el tiempo necesario para desde el inicio a la estación, y desde la estación a la destinación final. En efecto, el trayecto entre dos estaciones no debe provocar un desvío importante que aumentaría el tiempo total del transporte del usuario y que aniquilaría los beneficios de un tal medio de transporte a velocidad alta, y convertiría el aerotaxi en una alternativa no rentable para el viajero. En entornos urbanos, eso se concretiza por la proximidad de las estaciones con puntos estratégicos como distritos laborales, zonas de interés cultural y zonas residenciales pendulares. Directamente en relación con la implantación geográfica, la accesibilidad de las estaciones, es decir su proximidad con otros medios de transporte, es fundamental, en particular con estaciones de tren, paradas de tranvía, metro y taxi, aparcamientos de automóviles, bicicletas y motocicletas, y aeropuertos.

- **La eficiencia de los diferentes flujos:**

La eficiencia de los diferentes flujos de personas y de aerotaxis tiene que ser optimizada para garantizar al viajero que no se pierda tiempo entre su llegada a la estación y el despegue del aerotaxi, y de la misma manera entre el aterrizaje y su salida de la estación, incluso en periodos de alta demanda. Por un lado, depende de la disposición de las zonas de despegue/aterrizaje, de aparcamiento y de subida/bajada de los pasajeros, que tienen que facilitar la circulación de los aerotaxis y las posibilidades de operaciones simultáneas. Por otro lado, la eficiencia depende de la gestión de los flujos de personas. En efecto, la rapidez del vuelo en aerotaxi no puede ser

contrarrestada por un tiempo demasiado elevado de tránsito en la estación. El tamaño del edificio es determinante para la gestión de estos diferentes flujos.

- **La seguridad:**

Como para cualquier servicio de transporte, se debe garantizar la seguridad de los viajeros en todo momento. La presencia de personal de seguridad en la estación es imprescindible para garantizar el respeto de las normas de seguridad y controlar el acceso a las diferentes zonas de la estación. En la garantía de la seguridad, se incluye tanto la protección de los viajeros contra accidentes potenciales, como la protección del servicio contra su degradación o un desvío de su uso.

- **La estética y el bienestar:**

Más que un transporte rápido, los usuarios buscan también una experiencia de viaje. Por eso, la estética de la estación de aerotaxis tiene que dar un anticipo de la experiencia aérea, con un espacio abierto y depurado. Además, el bienestar de los viajeros tiene que ser garantizado por la presencia de comodidades, algunas imprescindibles (zonas de espera con asientos, aseos) y otras recomendadas para la experiencia cliente (tiendas, distribuidores de comida y bebidas).

- **El cuidado del medioambiente:**

Los segmentos de clientes más influyentes tienen preocupaciones por el medioambiente. Si el viaje en aerotaxi eléctrico permite reducir las emisiones de gases a efecto invernadero, el funcionamiento de la estación debe también tener un impacto reducido sobre el medioambiente.

Entonces este capítulo, a través de la análisis de los segmentos de clientes y de cuatro perfiles diferentes de pasajeros, ha permitido la identificación de la variación de la demanda correspondiente a sus actividades y de las necesidades de los clientes frente al servicio, presentando los criterios que participan a la calidad del servicio. Estos criterios son fundamentales para el diseño de la estación de aerotaxis porque son determinantes para la aceptación por el público de este nuevo medio de transporte. Con este capítulo y el anterior, se dispone ahora de toda la información necesaria para proponer una solución que tome en consideración tanto los requisitos técnicos como las necesidades cliente. Esta propuesta constituye el capítulo siguiente.

Capítulo 5: Propuesta de diseño

Este capítulo ofrece una propuesta concreta de una estación de aerotaxis para Lilium, teniendo en cuenta los diferentes requisitos identificados en los dos capítulos anteriores. Se construye poco a poco una solución posible de una estación, se justifica la elección de cada parte: la implantación geográfica, el tipo de construcción, la disposición de la pista, la organización del resto del edificio y de los flujos de personas y el equipamiento necesario para la operación del servicio y el mantenimiento de los aerotaxis.

5.1. Implantación geográfica

La implantación geográfica de las estaciones de aerotaxis depende mucho del tipo de conexión que se quiere establecer y del tipo de uso: para vuelos intraurbanos (conectando dos puntos dentro de una zona urbana densa), para vuelos centro-periferia (conectando un centro urbano con su periferia) y para vuelos interurbanos (conectando diferentes ciudades). Como el proyecto se basa en datos españoles, se ha elegido en este ejemplo como centro de implantación geográfica Madrid, capital de España, por su tamaño, actividad económica, cultural y turística, y su posición en el centro de España.

Un estudio realizado por Laura Plaza Santacruz para su Trabajo de Fin de Máster [PLAZ19] ha permitido la identificación de implantaciones geográficas potenciales para una primera fase de desarrollo centrado en la Comunidad de Madrid: tres estaciones en Moncloa-Aravaca, Nuevos Ministerios y Atocha para los vuelos intraurbanos, en combinación con tres otras en Las Rozas de Madrid, Alcobendas y Boadilla del Monte para los vuelos centro-periferia. El mapa de las diferentes rutas se muestra a continuación, en la Figura 14.



Figura 14: Mapa de las implantaciones potenciales de estaciones de aerotaxi y de las diferentes rutas entre ellos. Fuente: Laura Plaza Santacruz [PLAZI19]

Para vuelos interurbanos, se han utilizado las capacidades técnicas del Lilium Jet para determinar ciudades potenciales que podrían ser conectadas con Madrid. En efecto, como el Lilium Jet tiene una autonomía de 300km y una velocidad de 300km/h, se puede listar las ciudades que puede alcanzar el Lilium Jet, saliendo de Madrid, sin escala, y estimar el tiempo de vuelo correspondiente.

Resulta que se puede alcanzar una gran mayoría de las ciudades de tamaño medio de España, como se puede ver en la Figura 15: desde Jaén y Córdoba al sur hasta Vitoria al norte, y desde Mérida al oeste hasta Valencia al este. Se ha elegido listar solamente algunas ciudades de tamaño medio, por dos motivos. El primero es que, para asegurar una rentabilidad del servicio, hay que maximizar el factor de utilización de los aerotaxis, y por eso implantar las estaciones donde hay una densidad de población suficiente. El segundo motivo es que el mapa da una idea del rango que puede alcanzar el Lilium Jet sin escala, y otras paradas más insólitas, que servirían a Lilium para extender y completar su oferta, son proyectos que deben ser realizados una vez el servicio bien implantado, porque la rentabilidad es más insegura.

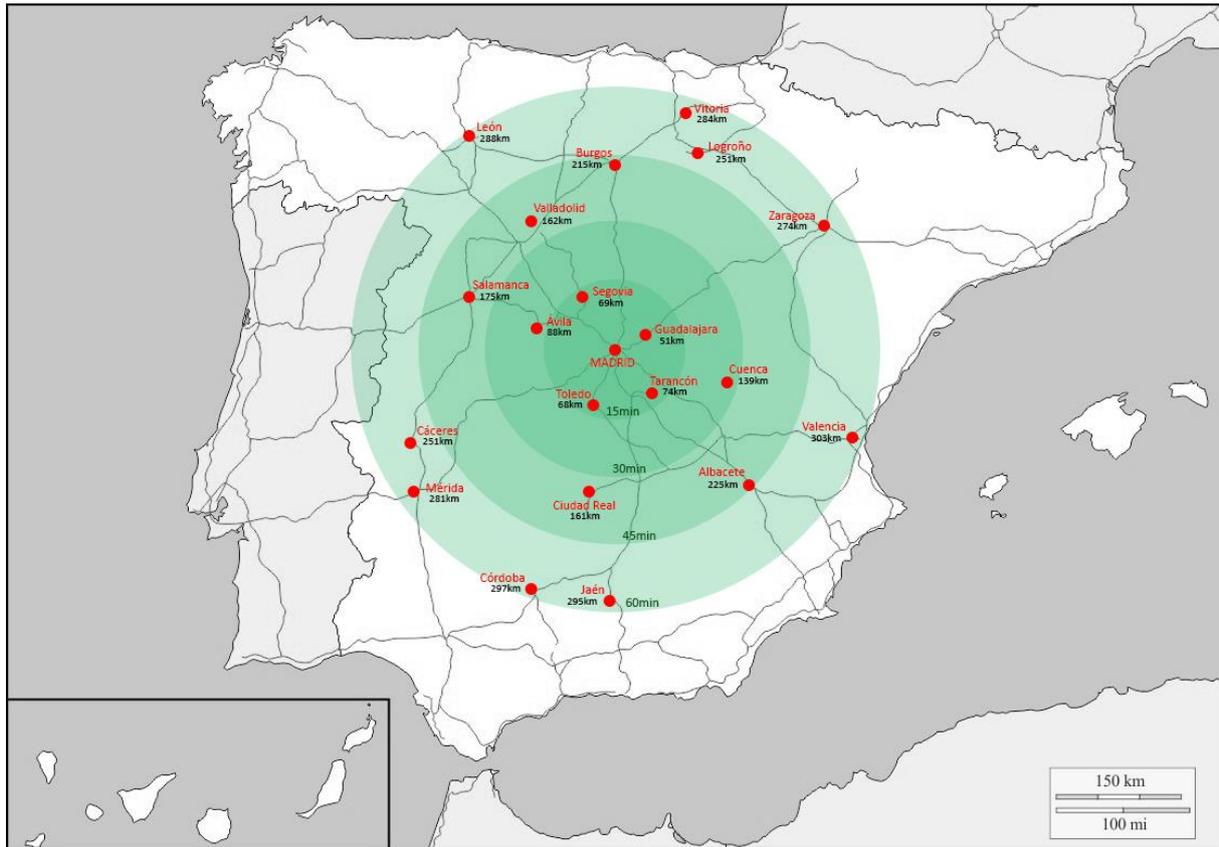


Figura 15: Mapa de ciudades accesibles directamente desde Madrid con el Lilium Jet. Fuente: elaboración propia, 2019

Se nota también que una implantación en Madrid permitiría competir con otros medios de transporte, en particular con los trenes y los aviones de corto recorrido, en tiempos muy competitivos, sobre todo con posiciones céntricas de las estaciones de aerotaxis, a la diferencia de la mayoría de las estaciones de trenes y de los aeropuertos en periferia, lo que aumenta la duración total del transporte.

El único inconveniente es que la autonomía del Lilium Jet no permite conectar Madrid directamente con dos otras zonas económicamente, culturalmente y turísticamente dinámicas de España, a saber, la Cataluña y la Andalucía. Pero, incluyendo una escala, se puede conectar Madrid a todo el resto de España, lo que significa que se puede teóricamente alcanzar cualquier lugar de España desde Madrid en dos horas máximo.

5.2. Tipo de edificación

El primer elemento que hay que definir para la construcción de la estación de aerotaxis es el tipo de edificación: ¿Se utiliza y se adapta un edificio existente, o se construye un edificio propio? ¿Es preferible tener vertipuertos de superficie, vertipuertos elevados o vertiplataformas sobre agua? ¿Se diseña el edificio sólo para este uso, o en combinación con otros servicios? Este apartado contesta a estas preguntas, justificando la elección en cada caso.

- **Edificio propio vs. edificio existente:**

A priori la reutilización de un edificio existente puede ser una opción interesante, especialmente en zonas urbanas densas. En efecto, la mayoría de las azoteas de los edificios, que sean rascacielos o edificios más bajos, pero con techos planos, no son utilizados actualmente. En entornos densos donde el precio del terreno es elevado, y no se quiere añadir más presión en el suelo, la solución de no construir un nuevo edificio para la estación de aerotaxis parece una buena opción. Dos casos serían de interés particular: los helipuertos existentes, porque ya disponen de una pista existente y las modificaciones a aportar serían mínimas, y la última planta de los garajes de aparcamiento de coches, por su conexión directa con otro medio de transporte. Pero, aunque eso podría reducir los costes de construcción de las estaciones de aerotaxis, habrá que realizar estudios previos para evaluar si la estructura del edificio existente permite la instalación de una estación de aerotaxis en su techo. Además, pueden surgir problemas de accesibilidad de la estación: por ejemplo, la mayoría de los helipuertos en España actualmente sólo son utilizados en caso de evacuación o de emergencia, y el acceso no está adaptado a un servicio de aerotaxis, y no incluye zonas de acogida y de espera para los viajeros.

Por eso, en un país como España, con metrópolis de densidad poco elevada en comparación con Nueva York o Hong Kong, el uso de edificios preexistentes para las estaciones de aerotaxis no es una buena opción. Además, la construcción de edificios propios tiene ciertas ventajas. Una primera ventaja es que se pueden repetir los mismos planos para construir varias estaciones de aerotaxis, creando economías de escala y facilitando su certificación de operación y su implantación en varios sitios. Otra ventaja es la flexibilidad de la implantación geográfica porque, en caso de edificios propios, hay menos restricciones para encontrar el sitio adecuado. Por último, la operación del servicio de aerotaxis con edificios propios facilita su gestión para Lilium, y constituye un punto de referencia identificable por el cliente en el paisaje urbano.

- **Vertipuertos de superficie vs. vertipuertos elevados vs. vertiplataformas sobre agua:**

Para la implantación de una estación de aerotaxis en Madrid, se puede eliminar directamente las vertiplataformas sobre agua, por motivos geográficos, dado que no hay una superficie acuática adaptada para la implantación de una tal estación. La cuestión es más de saber si es preferible un vertipuerto de superficie o un vertipuerto elevado. La ventaja de un vertipuerto de superficie es que es más compacto, y necesita menos construcción. Pero eso no contrarresta los argumentos de seguridad en favor de un vertipuerto elevado: en efecto, en entornos urbanos, es mucho más fácil restringir el acceso a las pistas de la estación de aerotaxis si el vertipuerto es elevado. Además, un vertipuerto elevado reduce las restricciones debido a las zonas de seguridad aéreas alrededor de la estación que tienen que ser libres de obstáculos. Entonces, la mejor opción es un vertipuerto elevado, pero en un edificio no demasiado alto (2 o 3 plantas), para mantener una accesibilidad rápida, criterio importante para los clientes.

- **Uso del edificio exclusivamente como estación de aerotaxis vs. uso compartido:**

Considerando una estación elevada, de varias plantas, construida especialmente para el servicio de aerotaxis, un uso compartido puede tener varias ventajas. Primero, puede ofrecer servicios complementarios a los utilizadores, que sean comodidades como tiendas de comida/bebida, o conexiones con otros medios de transporte (en particular aparcamientos, bicicletas, paradas de bus y de taxis). Lo ideal sería tener en la planta baja las conexiones directas con otros medios de transporte, y en la planta alta las pistas de despegue/aterrizaje. La planta intermediaria, facultativa, sería para incluir espacios alquilados a tiendas diversas, que constituirían una fuente de ingresos suplementarios para Liliium. De acuerdo con la visión de simplicidad de Liliium, esta planta intermediaria no debería añadir complejidad a los flujos de pasajeros para seguir enfocado en la actividad principal de transporte de personas.

5.3. Disposición de la pista

Para la pista de la estación de aerotaxis, se sabe a partir del primer subcapítulo del Capítulo 3 que se necesitan tres elementos fundamentales: una zona (o varias) de aterrizaje y despegue, una (o varias) zona de estacionamiento, y unas pistas de rodaje para conectarlas. En la determinación de la disposición de la pista entra por una parte el diseño conceptual, es decir el ratio entre el número de zonas de aterrizaje y despegue y el número de zonas de estacionamiento, y la organización de las vías para conectar las diferentes zonas; y por otra parte el dimensionado de todo eso según los requisitos técnicos.

- **Diseño conceptual:**

Para el diseño conceptual de la pista de la estación de aerotaxis, hay diferentes configuraciones, entre las cuales:

- una zona única para el aterrizaje, el despegue y el estacionamiento del aerotaxi, sin movimientos de los aerotaxis en la pista;
- una repartición "en estrella" con una zona de aterrizaje y despegue central, y varias pistas de rodaje alrededor que conducen cada una a una zona de estacionamiento;
- una repartición en "semi-estrella", similar a la anterior, pero con zonas de estacionamiento sólo en un lado de la zona de aterrizaje y despegue;
- una repartición linear con una zona de aterrizaje y despegue, y una única pista de rodaje que conduce a varias zonas de estacionamiento en fila;
- una repartición "en racimo", combinación de la repartición en estrella y linear, con una única pista de rodaje que se divide en varias ramas para las diferentes zonas de estacionamiento;
- una repartición desacoplada, que tiene por una parte varias zonas de despegue y aterrizaje y por otra parte varias zonas de estacionamiento, con un pista de rodaje intermediaria que permite la conexión de todas las zonas.

Las seis posibilidades más arriba son representadas en la Figura 16 a continuación.

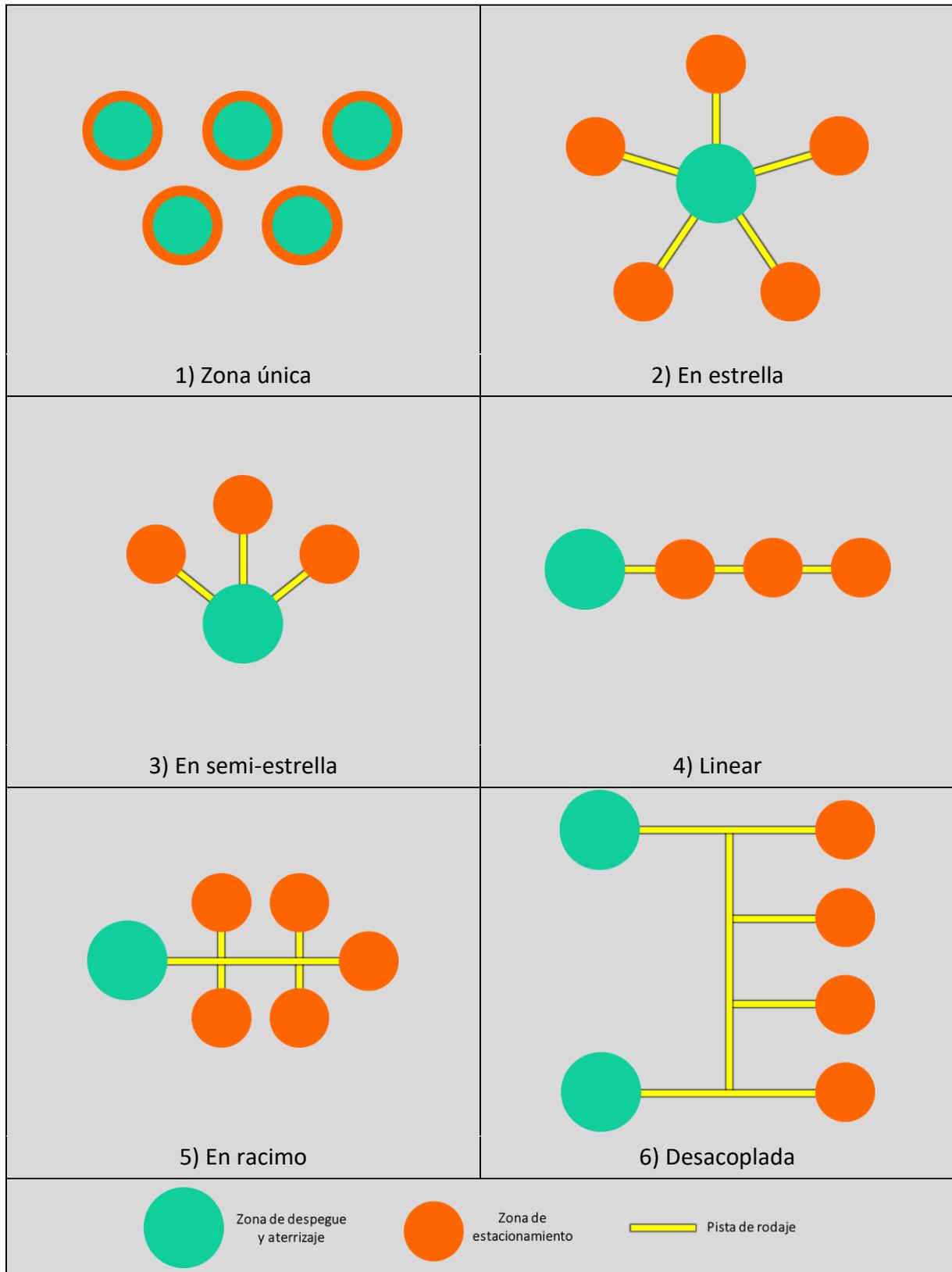


Figura 16: Representación de diferentes configuraciones posibles para la pista de la estación de aerotaxis. Fuente: elaboración propia, 2019

De estas seis configuraciones, se ha preseleccionado tres configuraciones que habrá que desempatar con el dimensionado: la configuración en semi-estrella, la configuración en racimo y la configuración desacoplada.

En efecto, la configuración en zona única permite un diseño a priori compacto, pero necesita más espacio en realidad para poder realizar operaciones simultáneas. Además, impide un estacionamiento a cubierto de los aerotaxis, y no facilita los flujos humanos para la subida y bajada de pasajeros. Por eso, se elimina.

En cuanto a la configuración en estrella, tampoco permite un diseño compacto porque cuando un aerotaxi se encuentra en la zona de despegue/aterrizaje, puede haber otros vehículos estacionados en todas las direcciones alrededor que representan obstáculos potenciales, en particular para la superficie de subida de despegue/acercamiento, conforme a lo descrito en el apartado "3.1.4. Obstáculos". Por eso, se elimina también.

La configuración en semi-estrella es bastante interesante, porque es tanta compacta como la configuración en estrella, pero sin sus inconvenientes, dado que hay toda una parte alrededor libre de obstáculos. Lo único es que puede reducir el factor de utilización de los aerotaxis porque impide operaciones simultáneas, dado que cada zona de estacionamiento está conectada a una única zona de despegue/aterrizaje, y también limita el número de zonas de estacionamiento por zona de despegue/aterrizaje.

La configuración linear es también muy compacta, pero lleva a una utilización de los aerotaxis en UEPS (último en entrar, primero en salir) que implica una diferencia de factor de utilización demasiado alta entre los diferentes vehículos. Po eso, se elimina.

La configuración en racimo tiene las mismas ventajas y desventajas que la configuración en semi-estrella. La única diferencia es que permite un número más grande de aparcamientos por zona de despegue/aterrizaje, pero es una configuración menos compacta.

La configuración desacoplada, como lo indica su nombre, es la única configuración que permite un desacoplo entre una zona de estacionamiento y una zona de despegue/aterrizaje determinada. De esta manera, cuando una de las zonas de despegue/aterrizaje está ocupada, otras operaciones se pueden efectuar de manera simultánea entre cualquiera otra zona de despegue/aterrizaje y cualquiera zona de estacionamiento. Pero, debido a la presencia de una pista de rodaje y de

varias zonas de despegue/aterrizaje, potencialmente con operaciones simultáneas, es una configuración menos compacta.

Para la elección de estas configuraciones, se han emitido varias suposiciones que se ha de aclarar. La primera es la presencia de una cubierta en la zona de estacionamiento, que parece importante para proteger los aerotaxis en caso de malas condiciones meteorológicas. La segunda es la eliminación previa de las configuraciones en fila, parecidas a las filas de taxis terrestres, porque implica un movimiento ilógico de todos los aerotaxis cada vez que uno despegue. La última es el hecho que la subida y la bajada de los pasajeros se hace cuando el aerotaxi se encuentra en la zona de estacionamiento. En efecto, la presencia de una zona intermedia entre el estacionamiento y el despegue/aterrizaje, sólo para la subida/bajada de pasajeros, implica una parada suplementaria en el trayecto del aerotaxi y aumenta el tiempo al suelo. Además, permite la subida y la bajada de los pasajeros en plena seguridad, lejos de los vehículos en movimiento.

En cuanto al ratio de zonas de estacionamiento por zona de despegue/aterrizaje, con la configuración elegida, se estima que tiene que ser como mínimo 3 y como máximo 5, para mantener un equilibrio entre compacidad y factor de utilización.

- **Dimensionado de la pista:**

Ahora que se han seleccionado tres configuraciones posibles de la pista, se pueden dimensionarlas, combinando los criterios técnicos emitidos en las dos partes del Capítulo 3. Como el dimensionado deriva directamente de este capítulo, se utilizan en este apartado directamente los diferentes términos técnicos sin reexplicarlos (distancia D, FATO, TLOF, área de seguridad, pista y ruta de rodaje, UCW, superficie de subida de despegue o de acercamiento, área de transición).

Como el edificio elegido corresponde a un vertipuerto elevado, y que los vehículos de Lilium no sobrepasan los 3175kg, conforme a los requisitos del Capítulo 3, se obtienen las siguientes dimensiones:

- $D = 11\text{m}$ y $UCW = 2\text{m}$;

- $FATO = TLOF = 1 D = 11\text{m}$;

- área de seguridad = $2 D = 22\text{m}$;
- pista de rodaje = $2UCW = 4\text{m}$;
- ruta de rodaje = $2 D = 22\text{m}$;
- zona de estacionamiento = $1,2 D = 13,2\text{m}$ con una zona de seguridad de $0,4 D = 4,4\text{m}$ alrededor.

Para la configuración desacoplada, se considera un criterio de operaciones simultáneas, porque es la principal ventaja de esta configuración. Eso implica, según el apartado "3.1.3. Dimensiones de las diferentes zonas del vertipuerto", una distancia de seguridad mínima de 60m entre el borde de la FATO y el borde de la pista de rodaje. Si la pista de rodaje tiene un ancho de 4m y la ruta de rodaje un ancho de 22m, la distancia de seguridad mínima entre el borde la FATO y el borde de la ruta de rodaje es de 51m. Este criterio no se aplica a las demás configuraciones, porque hay una sola zona de despegue/aterrizaje. Para las tres configuraciones, se ha intentado optimizar al máximo el espacio, y por eso se ha utilizado zonas de forma redonda y no cuadrada o rectangular.

Los resultados del dimensionado se muestran directamente con los planos de las tres configuraciones que constituyen la Figura 18, la Figura 19 y la Figura 20. Las distancias son indicadas en metros, y la leyenda de las diferentes zonas se indica en la Figura 17.

Se provee también una tabla comparativa (Figura 21) con diferentes variables para elegir la configuración más adaptada.

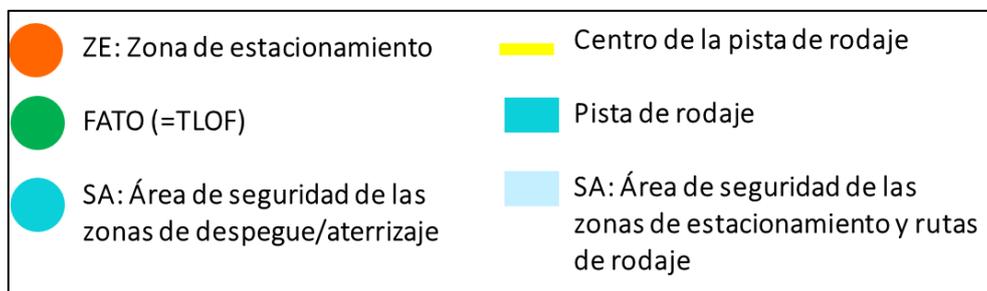


Figura 17: Leyenda de los diferentes símbolos utilizados en los planos de la pista. Fuente: elaboración propia, 2019

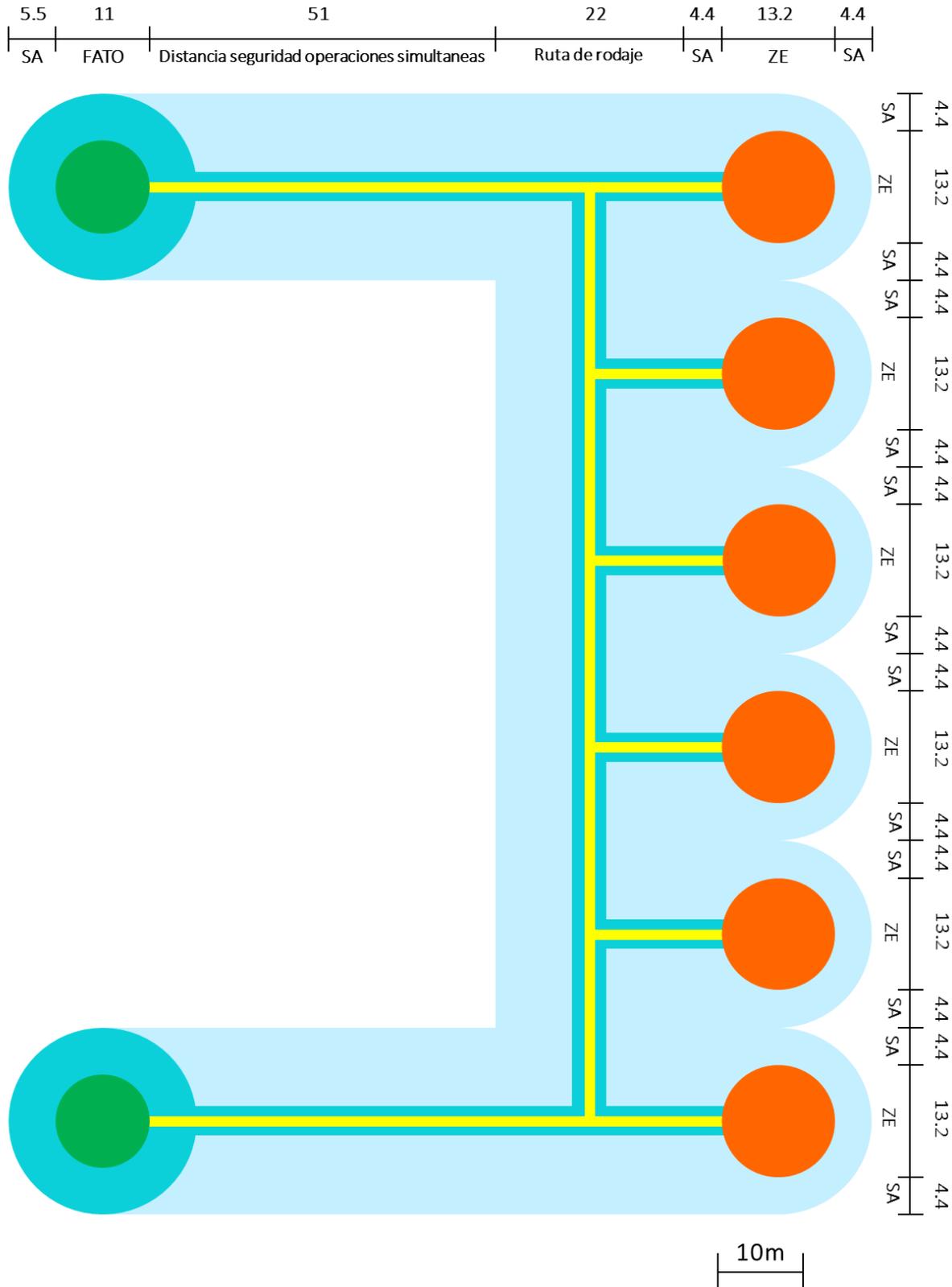


Figura 18: Plano dimensionado de la pista en configuración desacoplada. Fuente: elaboración propia, 2019

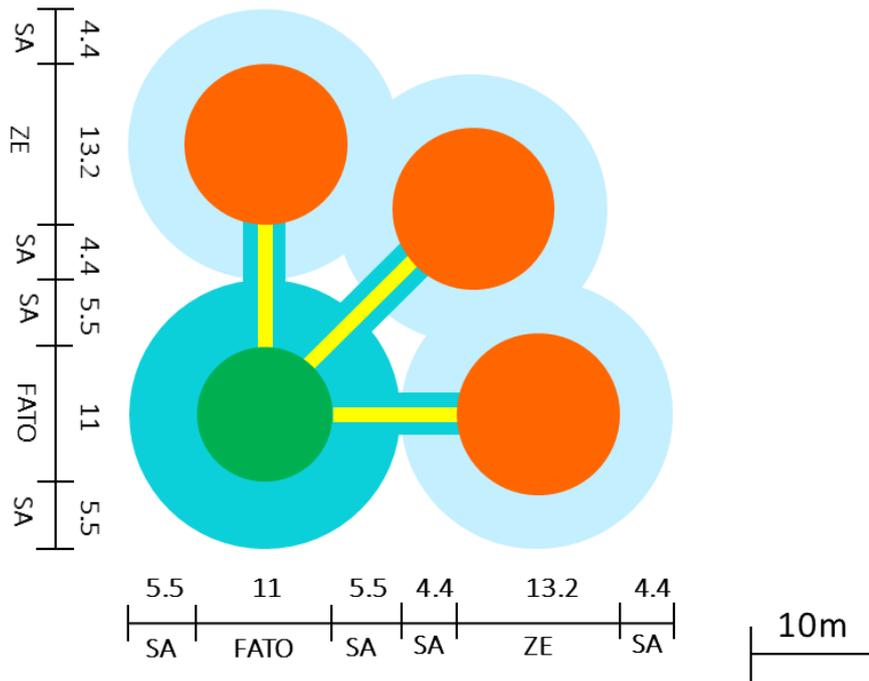


Figura 19: Plano dimensionado de la pista en configuración semi-estrella. Fuente: elaboración propia, 2019

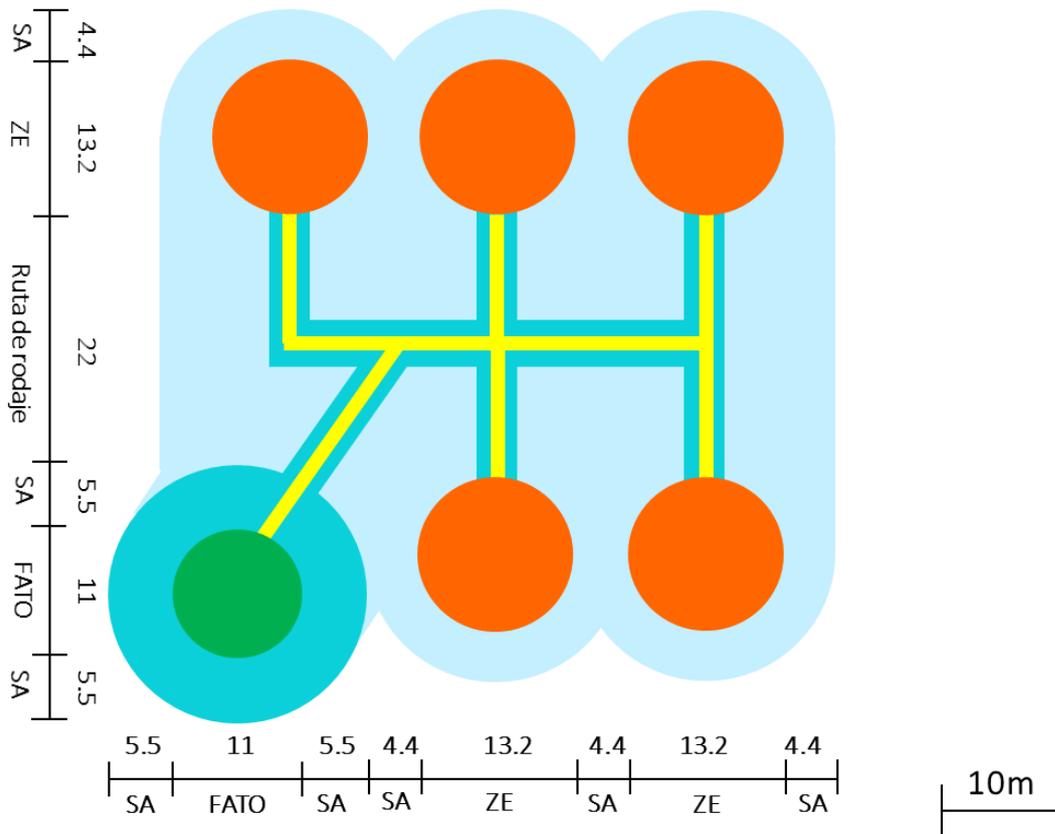


Figura 20: Plano dimensionado de la pista en configuración racimo. Fuente: elaboración propia

Configuración	Desacoplada	Semi-estrella	Racimo
Zonas de despegue/aterrizaje	2	1	1
Zonas de estacionamiento	6	3	5
Operaciones simultáneas	Sí	No	No
Dimensión total de la pista	111,5m X 132m	44m X 44m	61,6m X 61,6m
Superficie rectangular de la pista	14718m ²	1936m ²	3795m ²
Ratio superficie total/zonas de despegue	7359m ² /zona	1936m ² /zona	3795m ² /zona
Ratio superficie total /zonas de estacionamiento	2453m ² /zona	645m ² /zona	759m ² /zona

Figura 21: Tabla comparativa de las dimensiones y de la capacidad de tres configuraciones de pista: desacoplada, en semi-estrella y en racimo. Fuente: elaboración propia, 2019

Resulta que, a pesar de permitir operaciones simultáneas, la configuración desacoplada no es la óptima en entornos urbanos, porque implica una superficie demasiado grande para un edificio elevado urbano. No obstante, en otras condiciones, por ejemplo en las afueras de una zona urbana, podría ser una opción interesante para otro tipo de estación de aerotaxis, en superficie. Las configuraciones en semi-estrella y racimo se adaptan mucho más a un entorno urbano, y tienen ratios de superficie por zona de estacionamiento comparables. Aunque en el caso de la configuración en semi-estrella el ratio es un poco menor, no es suficiente para compensar el límite de 3 zonas de estacionamiento por zona de despegue/aterrizaje, y por este motivo la configuración en racimo parece, en definitivo, ser la más adecuada para este proyecto.

La Figura 22 a continuación ofrece una idea del aspecto visual de la pista con la configuración elegida, con las diferentes ayudas visuales, tal como previstas en el apartado "3.1.5. Ayudas visuales":

- una marca de identificación "H" en el centro de la FATO, de 3m de largo, 1,8m de ancho y 0,4m de espesor de letra;
- una marca blanca con líneas punteadas del perímetro de la FATO (con cada marca de 30cm de ancho y 1,5m de longitud y espacios entre 1,5m y 2m);

- los tres círculos de posicionamiento para cada estacionamiento: $\varnothing 5,5\text{m}$ y ancho 50cm, $\varnothing 9,13\text{m}$ y ancho 15cm, $\varnothing 13,2\text{m}$ y ancho 15cm;

- las marcas de pistas de rodaje, con una línea central amarilla de ancho 15cm y una línea doble amarilla de ancho 2x15cm para los bordes.

Para ser bien rigurosos, faltan en la Figura 22 la indicación del peso máximo admisible y el nombre de la estación de aerotaxis, que no se saben. Habría también que añadir iluminación y un indicador de viento.

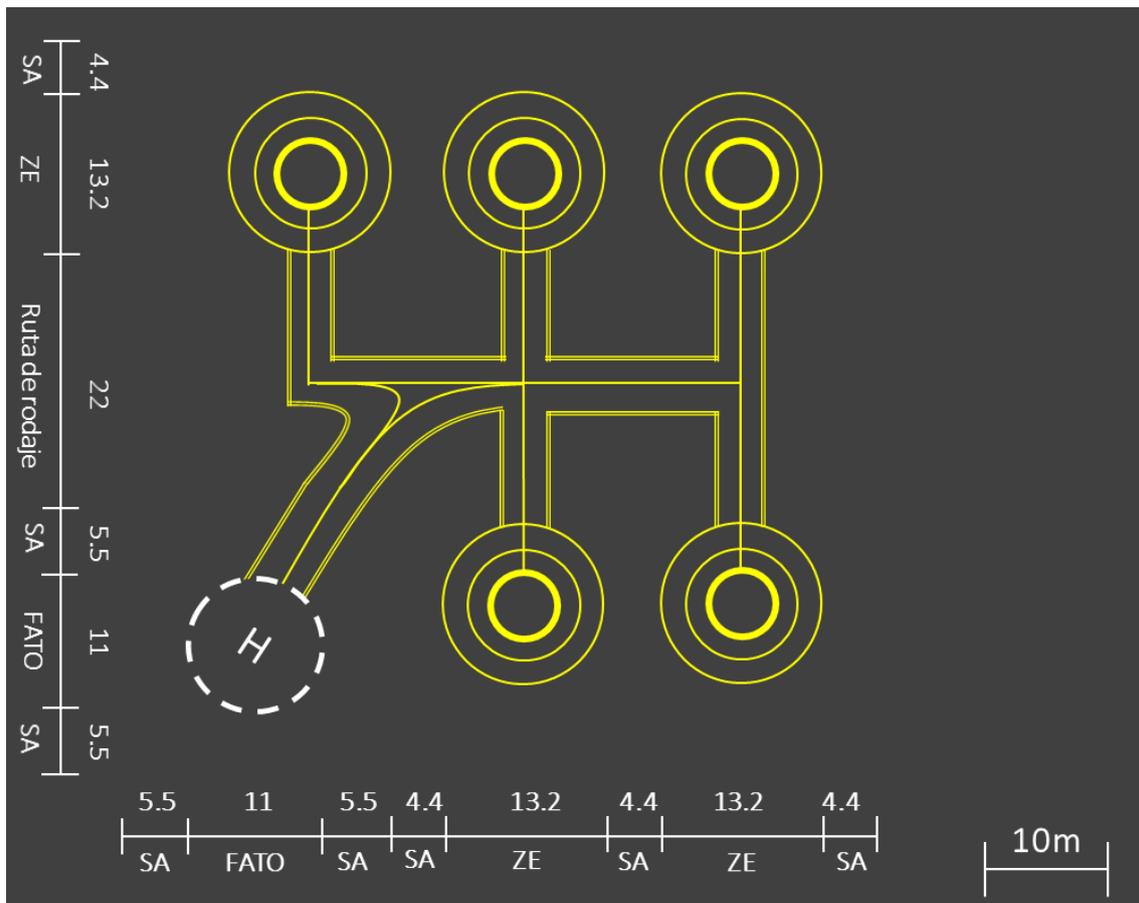


Figura 22: Representación de la pista con diferentes ayudas visuales. Fuente: elaboración propia, 2019

5.4. Resto del edificio y flujos de personas

Ahora que se ha diseñado la pista de la estación de aerotaxis, queda por definir el resto del edificio y organizar los diferentes flujos de personas.

- **Cubierta de las zonas de estacionamiento:**

Primero, como se ha hablado en el apartado anterior, se necesita una cubierta para resguardar los aerotaxis de malas condiciones climáticas. Para eso, se elige cubrir sólo la zona necesaria, es decir la zona que corresponde a los diferentes estacionamientos. Con dos techos de aproximadamente 3,50m de altura cubriendo las zonas de estacionamiento (uno para las tres zonas de estacionamiento que están en un lado, y otra para las dos demás) y unos pilares situados en la parte opuesta a las pistas de rodaje, se asegura, conforme a los requisitos del apartado "3.1.4. Obstáculos", que no constituyen obstáculos para las diferentes operaciones de los aerotaxis. Se puede visualizar la posición de las cubiertas en la Figura 24.

- **Zonas de circulación y de espera de los pasajeros:**

Como explicado en el apartado "4.3. Criterios de calidad del servicio", la seguridad es un elemento fundamental para satisfacer las necesidades cliente. Por eso hay que limitar al máximo la circulación de pasajeros en la pista. La solución es de poner un edificio en cada lado de los estacionamientos, con puertas que dan un acceso directo a cada zona de estacionamiento. Estas puertas tienen que ser de acceso restringido para evitar una penetración no deseada de viajeros en la pista (por ejemplo, restringir el acceso con un código digital o una tarjeta magnética, como en las puertas de embarque de los aeropuertos tradicionales).

Para organizar los diferentes flujos de pasajeros y las diferentes zonas correspondientes, lo más pertinente es listar las diferentes etapas que sigue un cliente durante todo el servicio de aerotaxi. Esta cadena de etapas se muestra a continuación, en la Figura 23. Es una cadena bastante sencilla, porque minimizar las etapas está de acuerdo con el criterio de eficiencia de los diferentes flujos.

Como elegido en el segundo apartado de este capítulo, la estación de aerotaxis es un edificio elevado, con varias plantas. Para no sobrecargar el espacio de la planta alta, sólo tiene la función de sala de espera. Para la comodidad de los viajeros, dispone obligatoriamente de asientos y

tablas. La sala de espera dispone también de comodidades, algunas imprescindibles como los aseos, otras facultativas como enchufes para cargadores o distribuidores de comida/bebida.

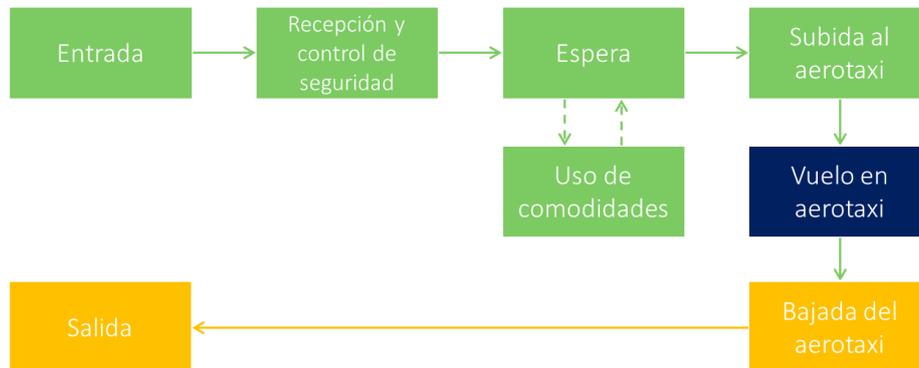


Figura 23: Cadena de etapas del cliente en el uso del servicio de un aerotaxi y su estación. Fuente: elaboración propia, 2019

Para equilibrar los flujos de personas, se pone el acceso a la(s) planta(s) inferiores a medio camino entre las zonas de estacionamiento, como representado en la Figura 24.

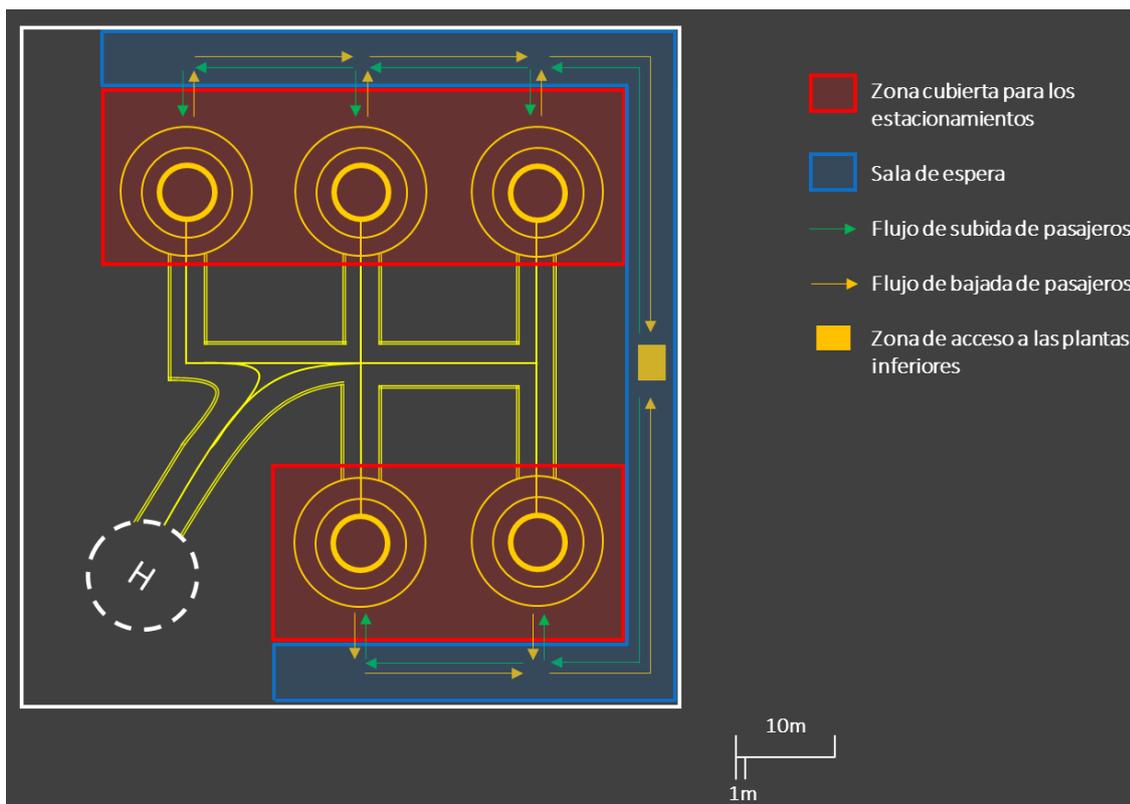
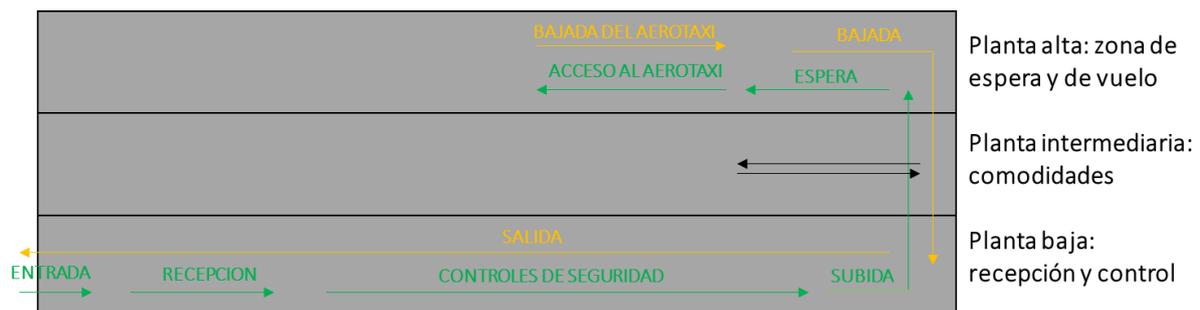


Figura 24: Representación de la planta alta de la estación de aerotaxis. Fuente: elaboración propia, 2019

- **Plantas inferiores:**

La planta baja tiene que ser dedicada a la recepción y a los controles de seguridad. Una disposición lineal con la entrada de un lado, la recepción y los controles de seguridad en medio y las escaleras y ascensores para el acceso a las plantas superiores. Además, la disposición lineal permite concentrar el flujo de viajeros entrantes en una fila. Se tiene que prever también otra fila separada para permitir la salida de los viajeros sin mezcla de flujos. Un sistema con puertas antirretornos puede ser una buena solución para asegurarse del buen sentido de los flujos de personas. No se detalla más la parte de controles de seguridad, porque no se sabe qué tipo de controles de seguridad son necesarios, en comparación con los controles en los aeropuertos (armas, productos peligrosos, etc.). Por eso, se ha elegido reservar una zona especial para este uso, en caso de un procedimiento similar a la de un aeropuerto. Si las autoridades deciden que no hace falta controles de seguridad, como para un viaje en taxi terrestre, habrá que modificar el esquema de la Figura 25, poniendo un acceso directo a la subida de los pasajeros.



*Figura 25: Esquema de los diferentes flujos de persona entre las plantas de la estación de aerotaxis.
Fuente: elaboración propia, 2019*

La organización de la planta intermedia no se detalle mucho en este proyecto, porque es facultativa, y de interés únicamente si se quiere poner tiendas u otros servicios directamente en el mismo edificio. Además, no tiene ninguna influencia en la gestión de los flujos de pasajeros, dado que es sólo un intermedio entre la zona de recepción y la zona de espera. El acceso entre las diferentes plantas se hace mediante ascensores y escaleras.

5.5. Equipamiento necesario para la operación y el mantenimiento de los aerotaxis

Como los aerotaxis de Lilium son eléctricos, el equipamiento necesario para su operación se limita a la recarga o al cambio de las baterías. Si se supone que la carga de las baterías de los aerotaxis se hace mediante cargadores situados cerca de las zonas de estacionamiento, se necesitan cargadores de grande potencia para asegurar una carga rápida que no afecte demasiado el factor de utilización de los aerotaxis. Como explicado en la sección "3.2.4. Eficiencia energética y carga de baterías", se podrían utilizar para los aerotaxis cargadores de batería comparables a los utilizados por Tesla para sus coches eléctricos. En particular, existen dos tipos de cargadores: los cargadores tradicionales, que permiten una carga total en 7h, y los cargadores rápidos, que permiten cargar 80% de la batería en tres cuartos de hora [TESL16]. Lo ideal sería disponer de un cargador rápido por estacionamiento, para optimizar el factor de utilización de los aerotaxis.

Según el apartado "3.2.4. Eficiencia energética y carga de baterías", hay también una posibilidad de realizar cambios in situ de baterías o battery-swapping, con un potencial acceso a la batería por detrás de la aeronave. En este caso, como se prevé un peso de 900kg para la batería, se recomienda el uso de un sistema robotizado de cambio de baterías. Pero, aunque los sistemas de battery-swapping optimicen la utilización de los aerotaxis, generan problemas logísticas de gestión de las baterías y añaden costes suplementarios debido a la presencia de numerosas baterías de recambio. Además, como la batería de una tal aeronave se considera como un componente crítico para el vuelo por las agencias de regulación, la confirmación de la certificación por las agencias de regulación de un vehículo que ha sufrido un cambio mayor de componente, y sin realizar una revisión completa del vehículo después del cambio, es un desafío mayor. En caso de tener un tal sistema, se puede imaginar la ubicación de una zona de battery-swapping entre las dos zonas de estacionamiento, tal como indicada en la Figura 26. El sistema funcionaría con un sistema de montacargas para almacenar las baterías en la planta por debajo, y así no sobrecargar el espacio de la última planta. Se podría también reemplazar una zona de estacionamiento por la zona de battery-swapping, con el almacén de baterías detrás, pero eso reduciría la capacidad de estacionamiento de la estación de aerotaxis.

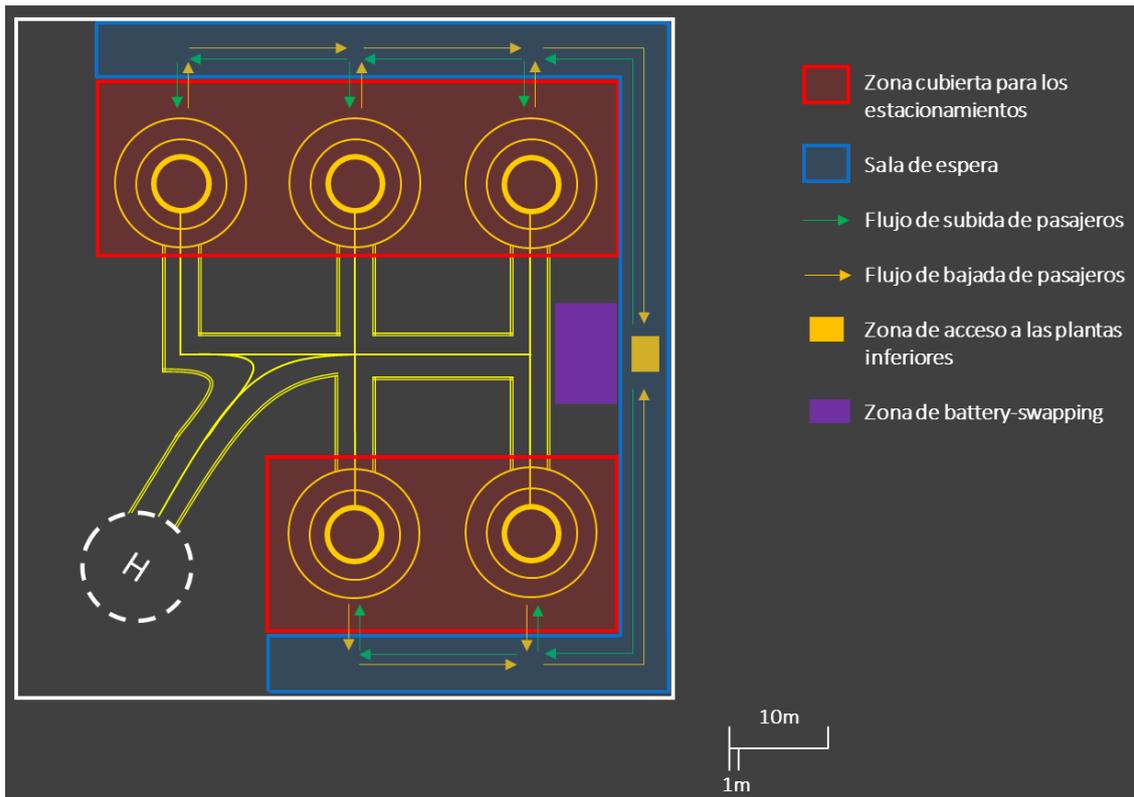


Figura 26: Representación de la planta alta de la estación de aerotaxis con la zona potencial de battery-swapping. Fuente: elaboración propia, 2019

Con respecto al mantenimiento de los aerotaxis, conforme a lo descrito en la sección "3.2.5. Mantenimiento", se realizará en las estaciones únicamente el mantenimiento en línea. El mantenimiento menor y mayor, que necesita muchas herramientas y mucho tiempo, se realizarán en hangares separados para no estorbar las estaciones de aerotaxis. Se prevé la presencia en la estación de un carrito o de una caja con las herramientas necesarias para el mantenimiento en línea, que tienen que ser accesibles fácilmente por los pilotos.

Como mostrado en este capítulo, se ha podido proponer un diseño adaptado para una estación de aerotaxis de Lilium, teniendo en cuenta los diferentes criterios identificados en los capítulos anteriores. En particular, el razonamiento ha permitido elegir implantaciones potenciales, el tipo de edificio, la configuración de la pista de aerotaxis, la organización espacial de las diferentes zonas accesibles a las personas, y el equipamiento necesario para la operación y el mantenimiento de los aerotaxis. Aunque se ha propuesto este diseño en particular, no significa que otros diseños similares no son válidos. Pero este apartado provee por lo menos el razonamiento que permite conducir a la solución más conveniente, y podría ser adaptado caso por caso, en particular cuando es imposible construir un edificio nuevo y que hay que adaptarse a restricciones adicionales debidas a la edificación preexistente.

Capítulo 6: Estudio económico

Una vez diseñada una solución para una estación de aerotaxis para Lilium, se propone en este capítulo un estudio económico para evaluar la financiación de un tal proyecto. Dado que el ámbito del proyecto no es la planificación de la logística y la viabilidad económica del servicio de aerotaxi, este estudio económico no se ha realizado incluyendo la viabilidad económica de todo el servicio, sino se enfoca en los dos aspectos que afectan directamente la estación de aerotaxis: su construcción y su operación.

Además, ya se ha realizado un estudio de la rentabilidad económica de un proyecto de implantación de un servicio de aerotaxis de Lilium en la Comunidad de Madrid. El resultado de este estudio da un valor actual neto de 12 millones de euros, lo que supone que el proyecto es rentable en un horizonte temporal de 10 años a partir de su implantación [PLAZ19].

6.1. Estimación del coste de construcción de una estación

En este apartado, se propone una estimación de los costes de inversión necesarios para la construcción de una estación de aerotaxis. Las hipótesis de cálculo se basan en la solución diseñada en el Capítulo 5, pero se consideran cuatro alternativas posibles:

- Escenario 1: Construcción integral de un edificio de 2 plantas (una planta baja para la recepción de los clientes, y una planta alta para la pista de despegue y aterrizaje);
- Escenario 2: Construcción integral de un edificio de 3 plantas (la tercera planta siendo una planta con varias tiendas o comodidades, conforme a lo explicado en el Capítulo 5);
- Escenario 3: Rehabilitación total de 2 plantas de un edificio existente;
- Escenario 4: Rehabilitación total de 3 plantas de un edificio existente.

Se han emitido varias hipótesis para los cálculos. Para la superficie del edificio, se elige el valor de 3800m² (aproximadamente 62m x 62m) conforme a la estimación realizada para la configuración en racimo (ver Figura 21). Se realizan los cálculos considerando también una construcción en Madrid.

Para estimar el coste de construcción de una estación de aerotaxis, se utiliza un método de determinación de costes de referencia de edificación propuesto por la Dirección General de Vivienda y Rehabilitación de la Comunidad de Madrid [DGVR15]. Con este método, se calcula un coste de referencia particularizado (CRP), expresado en euros por metro cuadrado, mediante la fórmula siguiente, cuyos componentes se explican a continuación:

$$CRP = CRG \times CS \times CA \times CH.$$

- **Coste de referencia general por tipo de edificación (CRG):** Es un intervalo de valores orientativo del coste de referencia general para una lista de los 36 tipos de edificación más comunes, expresado en euros por metro cuadrado. Las descripciones que se acercan más de la estación de aerotaxis son "Garaje en planta baja" (192-234€/m²) y "Locales comerciales en edificios" (240-381€/m²). Considerando la infraestructura necesaria, se escoge un intervalo de valores entre 200 y 300 €/m² construido para la estación de aerotaxis.

- **Coefficiente de situación geográfica (CS):** Se establecen tres tipos de áreas en función del nivel socioeconómico del entorno en que se sitúa la edificación. Madrid siendo una zona de urbanización de nivel socioeconómico elevado, se sitúa en un área que corresponde a un coeficiente de situación geográfica de 1,15.

- **Coefficiente de aportación en innovación o acabados (CA):** Es un coeficiente que estima el nivel de servicio para el diseño y los acabados y varía entre 0,80 cuando se realizan para coste reducido y 1,35 cuando se realizan con materiales suntuarios o de coste superior a dos veces el medio. Para la estación de aerotaxis, se elige un coeficiente de 1,00 que representa un diseño y unos acabados de características medias.

- **Coefficiente por rehabilitación (CH):** Es un coeficiente que interviene en casos de rehabilitación de una edificación preexistentes. Puede tener tres valores diferentes según el nivel de rehabilitación: 1,10 para una rehabilitación total, 0,65 para una rehabilitación de instalaciones y acabados, y 0,30 para una rehabilitación de los acabados únicamente. En caso de que no sea rehabilitación, el coeficiente vale 1,00. Para la estación de aerotaxis, se ha escogido el valor de 1,00 para los escenarios de construcción total. Para los escenarios de rehabilitación, se ha considerado una rehabilitación total (1,10) en la última planta, debido al carácter singular de la construcción, y una rehabilitación parcial (0,65) para las demás plantas.

Los resultados del coste de construcción en los cuatro escenarios se muestran en la **El valor en la izquierda corresponde a la última planta, y el de derecha a las demás plantas.*

Figura 27 a continuación. Los intervalos de coste de construcción fluctúan entre 1,53M€ y 3,93M€ según los escenarios, el escenario 3 siendo el más económico con un coste total de construcción estimado entre 1,53 y 2,29M€. En todos casos, representa una inversión considerable, pero muy reducida en comparación con otros costes, como los costes de fabricación de los aerotaxis que se estiman a 1M€ por vehículo para una producción media de 100 aerotaxis al año [UBER16].

Escenario	1	2	3	4
Tipo de construcción	Construcción integral	Construcción integral	Rehabilitación	Rehabilitación
Coste de referencia general	200-300€/m ²			
Coefficiente de situación geográfica	1,15			
Coefficiente de aportación en innovación o acabados	1,00			
Coefficiente por rehabilitación	1,00		1,10/0,65*	
Coste de referencia particularizado	230-345€/m ²		253-380€/m ² / 150-225€/m ² *	
Superficie total de las plantas	2x3800m ²	3x3800m ²	2x3800m ²	3x3800m ²
Coste total de construcción	1,75M€-2,62M€	2,62M€-3,93M€	1,53M€-2,29M€	2,10M€-3,15M€

**El valor en la izquierda corresponde a la última planta, y el de derecha a las demás plantas.*

Figura 27: Estimación del coste total de construcción de una estación de aerotaxis en distintos escenarios. Fuente: elaboración propia, 2019

Al coste de construcción calculado más arriba, habrá que añadir también el precio de adquisición del terreno. El precio medio del metro cuadrado de suelo urbano en municipios de más de 50000 habitantes de la Comunidad de Madrid siendo de 509€/m² en el primer trimestre del año 2019 [FOME19], el coste adicional de adquisición de una superficie de 3800m² se evalúa a 1,93M€.

Por último, si bien no menos importante, hay que tener en cuenta el coste de adquisición de los cargadores de batería de los aerotaxis. En efecto, el coste total de construcción calculado más arriba incluye los acabados. Pero como los cargadores de batería constituyen el principal equipamiento de las estaciones de aerotaxis, conviene detallar su coste aparte. Como explicado en la sección "5.5. Equipamiento necesario para la operación y el mantenimiento de los aerotaxis", se necesita un cargador por estacionamiento, e idealmente cargadores rápidos. Según varias fuentes, se estima el precio de un cargador tradicional a aproximadamente 9 000€ y de un cargador rápido a aproximadamente 230 000€ [UBER16, DEBO17]. En caso de utilizar únicamente cargadores rápidos, para una estación tal como diseñada en el Capítulo 5, que puede acoger 5 vehículos, representa una inversión considerable de 1,15M€. Si se baja el número de cargadores rápidos a 2, añadiendo 3 cargadores tradicionales, el coste baja a 0,49M€. Por este motivo, es mucho más probable encontrar en las estaciones de aerotaxis una combinación de cargadores tradicionales y rápidos. En el caso de utilizar un sistema de battery-swapping, se estima un coste adicional de 0,5M€ [VELA13], sin incluir el coste de los baterías de recambio.

6.2. Estimación de los costes e ingresos de operación

Los costes de operación principales en la estación de aerotaxis se resumen al consumo de energía eléctrica de los cargadores y al sueldo de los empleados.

En cuanto al personal, con controles de seguridad similares a los de los aeropuertos, se necesitan por lo menos 3 empleados. Además, para facilitar los flujos de personas, se necesitan un empleado suplementario para la recepción de los clientes y otro en la planta alta para guiarlos viajeros y controlar el buen uso de la estación. Suponiendo un sueldo bruto aproximativo de 1200€/mes para cada empleado, y añadiendo un 30% de gastos sociales, se obtiene un coste del personal anual de 93 600€.

En cuanto al consumo de energía eléctrica, se han emitido las siguientes hipótesis para calcularlo:

- Se supone la presencia en una estación de dos cargadores tradicionales y 3 rápidos, como en el apartado anterior. Se obtiene un tiempo medio de carga de 4 horas aproximadamente.
- Se supone una autonomía del aerotaxi de 1 hora en uso pleno, tal como indicado por Lilium (300km con una velocidad de 300km/h da una autonomía aproximativa de 1 hora).
- Considerando todos los tiempos de no utilización del aerotaxi, se supone un factor de utilización de 60%.
- Se reutiliza el valor emitido en la sección "3.2.4. Eficiencia energética y carga de baterías" de 150kWh para la energía de las baterías de los aerotaxis, y para simplificar se considera que son necesarios 150kWh para cargarla completamente.
- Se considera un coste medio de la energía eléctrica de 0,10€/kWh [REE_19].

Bajo estas hipótesis, se obtiene un valor de 2,9 cargas completas por día por aerotaxi, y un coste de 15€ por carga completa. Para una estación de 5 aerotaxis, se obtiene un coste anual total de la energía eléctrica de 78 825€ aproximadamente.

En cuanto a los ingresos de operación de la estación de aerotaxis, y no de los aerotaxis, son inexistentes porque el viajero paga para el servicio de vuelo, no paga directamente algo para el uso de la estación. No obstante, una fuente de ingresos potenciales para las estaciones de aerotaxis sería el alquiler de la planta intermediaria para tiendas de comodidades y servicios,

como descrita en el Capítulo 5. En efecto, el alquiler de los 3800m² de la planta intermediaria con un precio medio de alquiler de 5€/m²/mes podría representar una fuente de ingresos anuales de 228 000€. En comparación, con los valores de la Figura 27, el coste adicional de construcción de una planta intermediaria es de 1,31M€ máximo (comparación entre los escenarios 1 y 2). Entonces, con esta planta alquilada, el coste adicional de construcción de la planta intermediaria sería amortizado en 6 años como máximo, y generaría beneficios los años siguientes que compensarían los demás costes de operación.

Como mostrado en este capítulo, se ha podido efectuar un estudio económico del coste de construcción de una estación, que se sitúa entre 1,53M€ y 3,93M€ según los escenarios, al que hay que añadir el coste de adquisición del terreno, estimado a 1,92M€. Se ha también realizado una estimación del coste de adquisición de los cargadores de batería, entre 0,49M€ y 1,15M€ por estación según los tipos de cargadores instalados. Se ha también ofrecido una estimación de los diferentes costes anuales de operación para una estación: 93 600€ para el personal y 78 825€ para el consumo de energía eléctrica. Por último, se ha identificado una fuente potencial de ingresos anuales de 228 000€ con el alquiler de la planta intermediaria de la estación de aerotaxis. Estas simulaciones han sido realizadas con muchas hipótesis de trabajo, y los valores reales pueden diferir, pero tienen el mérito de ofrecer un orden de magnitud de los diferentes costes e ingresos.

Capítulo 7: Conclusiones

Este capítulo cierra el presente Trabajo de Fin de Máster, proponiendo algunas conclusiones sobre el cumplimiento y las diferentes aportaciones del proyecto. Además, se identifican cuáles son las limitaciones de este proyecto y como podrían convertirse en nuevos campos de investigación para trabajos futuros. Por último, se dan perspectivas futuras para Lilium y las empresas de aerotaxis.

7.1. Conclusiones sobre el cumplimiento y las aportaciones del proyecto

La meta de este Trabajo de Fin de Máster era proponer un diseño de una estación de aerotaxis para la aeronave eVTOL de la empresa alemana Lilium, y por eso se había expresado diferentes objetivos: analizar los requisitos técnicos del diseño de una estación de aerotaxis frente a las normativas vigentes, determinar las necesidades de los clientes frente a un servicio de aerotaxis para identificar los criterios más relevantes para los clientes a la hora de utilizar una estación de Lilium, elaborar una lista de requisitos técnicos que proceden de las particularidades del Lilium Jet, con el fin de proponer un diseño adaptado para la empresa y no para cualquiera aeronave, proponer una solución para el diseño de una estación de aerotaxis, justificando las decisiones con todos los requisitos susodichos, y ofrecer un estudio económico de la estación propuesta. Teniendo en cuenta estos objetivos, se han emitido varias conclusiones.

En primer lugar, se han extraído de la normativa internacional sobre los helipuertos de la OACI todos los criterios necesarios para que las dimensiones de las diferentes zonas de la pista de la estación cumplan con la regulación, incluyendo también todas las zonas de seguridad alrededor. Consiste básicamente en cuatro tipos de áreas: las áreas de despegue y aterrizaje, las áreas de estacionamiento, las áreas de rodaje para mover entre las dos primeras, y las zonas de seguridad que tienen que ser libre de obstáculos. La mayoría de las dimensiones de estas zonas depende de una dimensión controladora D que corresponde al máximo entre el ancho total y la longitud de la aeronave. Se han definido también las ayudas visuales necesarias en la pista, que sirven para identificar la estación y representar las diferentes áreas.

En segundo lugar, se ha concentrado la información técnica sobre el Lilium Jet. Como la aeronave todavía está en fase de ensayos, se han extrapolado las informaciones existentes para tener una ficha técnica más completa de la aeronave con sus dimensiones (en particular 11m de envergadura y 4,7m de longitud), su peso (aproximadamente 1700kg), la energía de la batería (estimada a 150kWh) y los diferentes tipos de mantenimiento necesarios.

En tercero lugar, se han evaluado las necesidades de los clientes. Por eso, se han identificado cuatro perfiles de clientes potenciales para el servicio de aerotaxi de Lilium: el trabajador pendular, el residente comunitario, el turista urbano y el explorador ocasional. Gracias al estudio de estos perfiles, se ha podido evaluar la variación de la demanda a diferentes escalas: a escala diaria, se han identificado en particular tres picos de demanda alta de 7.00 a 9.00, de 14.00 a 16.00 y de 19.00 a 21.00, y a escala anual, se ha previsto una demanda estable salvo una disminución en agosto. Se han también identificado los diferentes criterios de calidad del servicio para los clientes, en los que puede influir el diseño de las estaciones de aerotaxis: la implantación geográfica de las estaciones, la eficiencia de los diferentes flujos de personas y aerotaxis, la seguridad, la estética y el bienestar de los viajeros, y el cuidado del medioambiente.

En cuarto lugar, se ha propuesto un diseño de una estación de aerotaxis, justificando cada decisión combinando los diferentes criterios identificados previamente. Se propone la implantación geográfica de los aerotaxis en varios lugares de Madrid (Moncloa, Atocha, Nuevos Ministerios) y de la Comunidad de Madrid (Las Rozas de Madrid, Boadilla del Monte, Alcobendas) y gracias a la autonomía del Lilium Jet se puede alcanzar sin escala una gran mayoría de las ciudades de tamaño medio en España, desde Córdoba al sur hasta Vitoria al norte, y desde Mérida al oeste hasta Valencia al este. La propuesta incluye la construcción de un edificio propio para la estación, dedicado enteramente al servicio, con una planta baja para la recepción de los clientes y los controles de seguridad y una planta alta con la sala de espera y la pista de despegue y aterrizaje de los aerotaxis. La configuración espacial de la pista, "en racimo", ha sido elegida para optimizar el espacio y los flujos de aerotaxis, y ha sido dimensionada de acuerdo con los criterios técnicos de la normativa y del Lilium Jet. El edificio de una superficie aproximativa de 3800m² permite el estacionamiento de cinco aerotaxis, con una pista de despegue y aterrizaje. La estación dispone de un sistema para cargar las baterías, mediante cargadores enchufables o battery-swapping. Existe también una opción de una planta intermediaria en el edificio para incluir diversas tiendas de interés para los usuarios de la

estación. En cada momento se ha presentado esta solución como una de las soluciones posibles, con varias alternativas si los criterios de diseño cambian.

Por último, se ha realizado un estudio económico sobre los costes de construcción y operación de una estación de aerotaxis. Entre otros resultados, se ha evaluado un coste de construcción de una estación entre 1,53M€ y 3,93M€ según los escenarios, al que hay que añadir el coste de adquisición del terreno, estimado a 1,92M€. En cuanto a los costes anuales de operación, se han estimado a 93 600€ para el personal y 78 825€ para el consumo de energía eléctrica. Se ha identificado también una fuente potencial de ingresos anuales de 228 000€ con el alquiler de la planta intermediaria de la estación de aerotaxis.

En cuanto a las aportaciones de este proyecto, el ámbito de este proyecto, más que proponer un diseño de una estación de aerotaxis, ha sido de ofrecer una guía de los diferentes requisitos a considerar y de cómo explotarlos para obtener el resultado adecuado de una estación de aerotaxis, no solamente para Lilium, sino también para cualquiera empresa interesada en el desarrollo de un servicio de aerotaxis. A nivel académico, este proyecto permite la exploración de una actividad muy innovadora que ha sido poco estudiada hasta ahora, y entonces de ampliar los conocimientos sobre este tema. Por último, a nivel personal, este proyecto me ha permitido entender y de aplicar un proceso de diseño para ofrecer una solución adaptada a un problema concreto. Además, he podido ampliar mi cultura general sobre el tema de los aerotaxis y de la aeronáutica en general que no conocía y que probablemente será una fuente de innovaciones en los años venideros.

7.2. Limitaciones del proyecto y oportunidades de trabajos futuros

A pesar de los resultados susodichos, hay que reconocer que este proyecto tiene algunas limitaciones que sobrepasan su ámbito y que podrían convertirse en oportunidades para investigaciones futuras.

La primera limitación de este proyecto ha sido la falta de datos precisos en cuanto al Lilium Jet y a su uso. En efecto, eso es debido al carácter muy novedoso del proyecto, y se entiende perfectamente que, para un servicio que no tiene nada de comparable con lo que existe actualmente, se alimenta una cultura del secreto por parte de Lilium. La comparación de este proyecto con datos confidenciales de Lilium podría permitir la validación o la corrección de los resultados obtenidos. Hay también mucha incertidumbre sobre la demanda, porque depende mucho de la adopción de este nuevo medio de transporte por el público.

Otra limitación de este proyecto ha sido la falta de detalles constructivos sobre la estructura del edificio. En efecto, el proyecto era más enfocado en la parte organizacional operativa de la estación de aerotaxis y en su diseño conceptual que en la parte constructiva. En eso, esta parte podría ser completada por un estudio de ingeniería civil o de arquitectura, por fin de dimensionar la estructura de la solución propuesta, o de evaluar la viabilidad estructural de la rehabilitación de un edificio existente para una estación de aerotaxis.

Por otra parte, una limitación de este proyecto es que puede volverse obsoleto dentro de poco tiempo, debido a la rapidez de los cambios en este sector muy reciente y innovador, que puede evolucionar de varias maneras en los años que vienen. La mayoría de las empresas de aerotaxis van cambiando su modelo en función de los avances más recientes, y la cantidad y el contenido de las informaciones sobre el mundo de los aerotaxis ya ha evolucionado mucho durante el periodo de este proyecto, y probablemente seguirá evolucionando mucho.

7.3. Perspectivas futuras para Lilium y las empresas de aerotaxis

Este proyecto es también una oportunidad de evaluar cuales son las perspectivas futuras para Lilium, y más globalmente para la industria de los aerotaxis.

Hay muchas interrogaciones sobre la inclusión de los aerotaxis en el paisaje urbano porque plantea en particular cuestiones de seguridad, de privacidad, de viabilidad y de contaminación visual del cielo que pueden frenar las municipalidades en su adopción. Convencer las municipalidades y el público de los beneficios de un servicio de aerotaxis, mediante la implantación de proyectos experimentales en ciudades pilotos, será un punto tanto crucial en el éxito del proyecto que la capacidad de volar de la aeronave.

Dentro de la industria de los aerotaxis, Lilium tiene una posición muy prometedora. Ha podido hasta ahora llamar la atención de inversores muy potentes (como Tencent), lo que le ha permitido asegurarse una base sólida para desarrollarse. Además, como visto en el proyecto, Lilium tiene un modelo de negocio bien equilibrado, con una propuesta de valor real y un servicio completo desde el diseño de la aeronave hasta la operación del servicio de aerotaxi. El futuro decidirá de si este modelo habrá sido suficiente para competir con los titanes de la industria del transporte como Airbus o Uber, y con otras startups tanto dinámicas como Lilium.

Por último, se puede cuestionar de manera más conceptual los beneficios reales de este servicio de aerotaxi: ¿Servirá realmente para aumentar las conexiones entre diferentes comunidades y zonas de niveles socioeconómicos diferentes, o reforzará las desigualdades de movilidad entre centros urbanos dinámicos y regiones rurales aisladas? ¿Las emisiones durante todo el ciclo de vida de los aerotaxis justificarán realmente que tiene cabida en el mundo de los transportes, en un contexto de preocupado creciente por el medioambiente? ¿Se alcanzará la meta de tener un servicio de aerotaxi asequible para todos, o se convertirá en un medio de transporte lujoso para un puñado de gente? Son algunas de las preguntas que plantean los aerotaxis actualmente y que habrá que resolver en los años venideros. Pero de toda forma, no cabe duda de que el interés para este medio de transporte revolucionario seguirá creciendo.

Bibliografía

[BACC19]	Bacchini, Alessandro & Cestino, Enrico, "Electric VTOL Configurations Comparison", Aerospace, 28/02/2019.
[BAXT17]	Baxter, Stephen, "Dude, where's my flying car?", Financial Times, 11/02/2017.
[BELL19]	Bell, "Welcome to the future of flight", 2019. Accesible en http://www.bellflight.com/company/about .
[BOND19]	Bond, Shannon, "Uber adds Melbourne to flying taxi plans", Financial Times, 11/06/2019.
[CORG18]	Corgan, "Corgan's Mega Skyport", 2018. Accesible en http://www.corgan.com/story/connect-corgans-mega-skyport .
[COTE99]	Côté, Jean-Marc, "En l'an 2000 : Aero-Cab Station" (postal), 1899.
[DEBO17]	DeBord, Matthew, "UBS predicts Tesla will need to spend \$8 billion to expand its Supercharger network", Business Insider, 04/03/2017. Accesible en http://www.businessinsider.fr/us/tesla-supercharger-network-expansion-costs-8-billion-ubs-2017-3 .
[DELO2018]	Deloitte Insights, "Elevating the future of mobility: Passenger drones and flying cars", 2018.
[DGVR15]	Dirección General de Viviendas y Rehabilitación de la Comunidad de Madrid, "Costes de referencia de edificación", 2015. Accesible en http://www.madrid.org/bdccm/utilidades/costesreferencia/CORA_HTML_2013/documentos/METODO15cora.pdf .
[EHAN19]	EHang, "EHang Passenger AAV", 2019. Accesible en http://www.ehang.com/ehang184 .
[EVDA19]	Electric Vehicle Database, "Tesla Model S Performance price and specifications", 2019. Accesible en http://ev-database.org/car/1207/Tesla-Model-S-Performance .
[EVTO19]	The Vertical Flight Society, EVTOL News, 2019. Accesible en http://evtol.news .

[FOME19]	Ministerio de Fomento de España, "Estadística de precios de suelo urbano: Precio medio del metro cuadrado de suelo urbano en municipios de más de 50.000 habitantes ", 2019. Accesible en http://apps.fomento.gob.es/BoletinOnline2/?nivel=2&orden=36000000 .
[ICAO13]	International Civil Aviation Organization, "Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes – Volume II: Heliports", 4ª edición, 07/2013.
[IEST10]	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, "Encuesta de empleo del tiempo", 2009-2010. Accesible en http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/sociales/estructueet.htm .
[INE_19]	Instituto Nacional de Estadística, "Transporte urbano: metro y autobús en ciudades que dispongan de metro", 2012-2019. Accesible en http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=20193 .
[LILI19]	Lilium, "The Jet", 2019. Accesible en http://lilium.com/the-jet .
[LILI19_2]	Lilium Blog, "From the oceans to the skies – the inspiration behind the Lilium Jet design", 06/08/2019. Accesible en http://lilium.com/newsroom-detail/from-the-oceans-to-the-skies-the-inspiration-behind-the-lilium-jet-design .
[LILI19_3]	Lilium Blog, " You've never seen anything like this - an introduction to the Lilium Jet", 15/05/2019. Accesible en http://lilium.com/newsroom-detail/youve-never-seen-anything-like-this-an-introduction-to-the-lilium-jet .
[MORG19]	Morgan Stanley, "Are Flying Cars Preparing for Takeoff?", 2019. Accesible en http://www.morganstanley.com/ideas/autonomous-aircraft .
[OTT16]	Office of Technology Transitions, " Battery500 Consortium to Spark EV Innovations: Pacific Northwest National Laboratory-led, 5-year \$50M effort seeks to almost triple energy stored in electric car batteries", 28/07/2016. Accesible en http://www.energy.gov/technologytransitions/articles/battery500-consortium-spark-ev-innovations-pacific-northwest-national .

[PLAZ19]	Plaza Santacruz, Laura, "Planificación de la logística y viabilidad económica del servicio de aerotaxi eléctrico en Madrid", ICAI – Universidad Pontificia de Comillas, 07/2019.
[REE_19]	Red Eléctrica de España, "Término de facturación de energía activa del PVPC vehículo eléctrico", 2019. Accesible en https://www.esios.ree.es/es/analisis/1015 .
[ROSE19]	Rose Dickey, Megan, "Uber unveils new Skyport designs for Uber Air", Tech Crunch, 11/06/2019.
[SPER19]	Spero, Josh, Pfeifer, Sylvia & Liu, Nicolle, "Air safety agencies rush to draw up rules for flying taxis", Financial Times, 03/06/2019.
[TEDX19]	TEDx Talks, " Aircrafts with vertical takeoff and landing will transform our lives Remo Gerber TEDxZurichSalon", 15/04/2019. Accesible en http://www.youtube.com/watch?v=tDKmotEjvzY .
[TESL16]	The Tesla Team, " New Tesla Model S Now the Quickest Production Car in the World", 23/08/2016. Accesible en http://www.tesla.com/blog/new-tesla-model-s-now-quickest-production-car-world .
[UBER16]	Uber Elevate, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation", 10/2016.
[UBER19]	Uber, "Uber Elevate", 2019. Accesible en http://uber.com/elevate .
[VELA13]	Velazco, Chris, "Tesla shows off a 90-second battery swap system, wants it at supercharging station by year's end", TechCrunch, 21/06/2013. Accesible en http://techcrunch.com/2013/06/20/tesla-shows-off-a-90-second-battery-swap-system-wants-it-at-supercharging-stations-by-years-end/ .
[VERD15]	Verdú, Daniel, "La generación Z cambiará el mundo", El País, 03/05/2015. Accesible en http://elpais.com/politica/2015/05/02/actualidad/1430576024_684493.html .
[VOLO19]	Volocopter, "Volocopter Company", 2019. Accesible en http://www.volocopter.com/en/company .
[VUEL19]	Vuela Sin Miedo, "Mantenimiento de aviones", 2013. Accesible en http://vuelasinmiedo.es/aviacion/mantenimiento-de-aviones .

