

Trabajo de Fin de Máster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

**ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA Y MODELO
OPERATIVO DE LOS AEROTAXIS**

MEMORIA

Autor: Carolina Gil-Penna Alier

Director: Carles Martínez - Marí

Convocatoria: Enero 2022

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El mundo del transporte evoluciona constantemente para cumplir con una demanda de movilidad cada vez más importante. Diferentes compañías de VTC (Vehículo de Transporte con Conductor) han revolucionado el sistema de transporte tradicional del taxi en las ciudades, por la facilidad y calidad que este servicio ofrece a sus clientes. No obstante, la problemática de la contaminación y la sobrecarga del tráfico son problemas todavía muy presentes en la sociedad.

El informe de evaluación de la calidad del aire [1], presentado por la Agencia de Salud Pública de Barcelona, afirma que los niveles contaminantes de la ciudad superan desde hace un tiempo los recomendados por la Organización Mundial de la Salud. También pone de manifiesto que los valores de la mayoría de los contaminantes están relacionados con el tráfico de la ciudad. Esto mismo está ocurriendo en numerosas ciudades.

Por ello, en el contexto de este proyecto se propone una nueva forma de movilidad urbana: los aerotaxis. En los últimos años, los vehículos aéreos eléctricos buscan posicionarse como una alternativa válida para trasladarse dentro de las congestionadas ciudades urbanas o interurbanas. Así pues, esta nueva modalidad aparece como una solución que puede minimizar en gran medida el impacto tan negativo que suponen tanto la contaminación acústica como el tráfico generado en las ciudades y carreteras que se puede observar a diario.

Con tal de aproximarse un poco más a la realidad y poder llevar el proyecto a cabo, se ha considerado necesario estructurar el proyecto en tres diferentes partes: en primer lugar, realizar un estudio de mercado para conocer el estado del arte de estos vehículos y determinar qué tipo de aeronaves serían las más adecuadas para dar el servicio. Una vez hecho esto, se podrá estimar la demanda que podría tener esta nueva forma de movilidad, habiendo establecido las rutas más concurridas en España, cuáles de estas se ven más afectadas por el tráfico; etc.

Por último, y una vez conocidas las condiciones generales, se podrá establecer un modelo operativo para su implementación.

ÍNDICE

1. GLOSARIO.....	9
2. PREFACIO	10
2.1. Origen del proyecto.....	10
2.2. Motivación	10
3. INTRODUCCIÓN	12
3.1. Objetivos del proyecto	12
3.2. Alcance del proyecto.....	13
3.3. Limitaciones del proyecto	14
4. AEROTAXIS.....	15
4.1. Estaciones de aerotaxis.....	15
4.2. Regulación y normativas	17
4.3. Estudio de mercado.....	18
4.3.1. Lillium Aviation.....	18
4.3.2. Joby Aviation.....	20
4.3.3. Volocopter.....	20
4.3.4. Airbus.....	21
4.3.5. EHang	22
5. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA.....	26
5.1. Rutas	27
5.2. Elección de la ruta.....	33
5.3. Estudio de congestión.....	34
5.4. Estudio de movilidad.....	36
5.4.1. Datos de movilidad total – Orange.....	37
5.4.2. Datos de movilidad coches – DGT.....	39
5.4.3. Datos de movilidad avión – AENA	42
5.4.4. Datos de movilidad tren – RENFE	43
5.5. Estimación de la demanda	44
5.5.1. Situación actual.....	47
5.5.1.1. Cálculo de tiempos y coste generalizado del coche.....	48
5.5.1.2. Cálculo de tiempos y coste generalizado del avión.....	49
5.5.1.3. Cálculo de tiempos y coste generalizado del tren	51
5.5.2. Modelo Logit	53
5.5.3. Análisis del modelo.....	60
5.5.4. Situación futura.....	63

5.6. Variación de la demanda	69
6. MODELO OPERATIVO	71
6.1. Normativa reguladora	72
6.2. Infraestructura	72
6.3. Recursos humanos	73
6.4. Recursos financieros	73
6.5. Eficiencia energética y recarga de baterías	73
6.6. Mantenimiento.....	76
6.7. Flota de aeronaves y gestión.....	77
6.8. Sistema de reserva	79
6.9. Coste del transporte.....	82
CONCLUSIONES	85
OPORTUNIDADES FUTURAS.....	88
AGRADECIMIENTOS	90
BIBLIOGRAFÍA	91
Referencias bibliográficas	91
Bibliografía complementaria.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista aérea de un vertipuerto. Fuente: Ferrovial.....	16
Figura 2: Lillium Jet. Fuente: Lillium Aviation.....	19
Figura 3: Joby S4. Fuente: Joby Aviation.....	20
Figura 4: Volocity. Fuente: Volocopter	21
Figura 5: Prototipo de los vertipuertos según Airbus. Fuente: Airbus	22
Figura 6: Airbus Vahana. Fuente: Airbus	22
Figura 7: EHang 184. Fuente: EHang	23
Figura 8: EHang 216. Fuente: EHang	23
Figura 9: Señalización gráfica de la ruta. Fuente: propia.....	33
Figura 10: Ruta Barcelona - Valencia en coche. Fuente: Google Maps	39
Figura 11: Leyenda I.M.D vehículos. Fuente: mapa de tráfico de la DGT	40
Figura 12: Visualización gráfica del modelo Logit. Fuente: Transportes, MUEI, UPC.....	43
Figura 13: Variable del modelo Logit. Fuente: Transportes, MUEI, UPC.....	43
Figura 14: Ecuación del modelo Logit. Fuente: Transportes, MUEI, UPC	43
Figura 15: Ecuación del modelo Logit. Fuente: propia.....	43
Figura 16: Representación gráfica del tiempo de viaje. Fuente: Transportes, ETSEIB, UPC...	47
Figura 17: Método de los mínimos cuadrados. Fuente: propia	61
Figura 18: Recta de ajuste por mínimos cuadrados (distancias mínimas). Fuente: propia	61
Figura 19: Pantalla de inicio de la aplicación. Fuente: propia.....	79
Figura 20: Pantalla principal de la aplicación. Fuente: propia	80
Figura 21: Coste/distancia de diferentes vehículos. Fuente: Uber Elevate.....	83

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Función del repartimiento modal según el modelo Logit multinomial.....	45
Ecuación 2: Parte observable de la función utilidad.	45
Ecuación 3: Función utilidad.....	46
Ecuación 4: Cálculo del coste generalizado del modo de transporte.....	46
Ecuación 5: Función comodidad	54
Ecuación 6: Modelo Logit adaptado al proyecto	54
Ecuación 7: Logit, Barcelona - Valencia, coche	56
Ecuación 8: Logit, Barcelona – Valencia, tren.....	56
Ecuación 9: Logit, Barcelona – Valencia, avión	57
Ecuación 10: Logit, Barcelona – Castellón, coche.....	57
Ecuación 11: Logit, Barcelona – Castellón, tren	57
Ecuación 12: Logit, Barcelona – Girona, coche	57
Ecuación 13: Logit, Barcelona – Girona, tren.....	57
Ecuación 14: Logit, Barcelona – Tarragona, coche	57
Ecuación 15: Logit, Barcelona – Tarragona, tren.....	57
Ecuación 16: Logit, Barcelona – Palma de Mallorca, avión.....	57
Ecuación 17: Logit, Barcelona – Palma de Mallorca, barco	58
Ecuación 18: Logit, Barcelona – Ibiza, avión	58
Ecuación 19: Logit, Barcelona – Ibiza, barco	58
Ecuación 20: Función objetivo.....	58
Ecuación 21: Logit, Barcelona - Valencia, coche	63
Ecuación 22: Logit, Barcelona – Valencia, tren.....	63
Ecuación 23: Logit, Barcelona – Valencia, avión	63
Ecuación 24: Logit, Barcelona - Valencia, coche. Situación futura	64
Ecuación 25: Logit, Barcelona – Valencia, tren. Situación futura	64
Ecuación 26: Logit, Barcelona – Valencia, avión. Situación futura.....	64

Ecuación 27: Logit, Barcelona – Valencia, aerotaxi. Situación futura	64
Ecuación 28: Cálculo eficiencia batería Tesla.....	74
Ecuación 29: Cálculo capacidad batería Lillium Jet.....	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Índice de congestión según hora del día y periodo. Fuente: propia	35
Gráfico 2: Demanda según el modo de transporte. Fuente: propia	44
Gráfico 3: Representación gráfica de la recta de ajuste. Fuente: propia	62
Gráfico 4: Variación de la demanda del servicio de aerotaxi. Fuente: propia	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones técnicas de diferentes eVTOL. Fuente: propia	24
Tabla 2: Tabla de puntuaciones de las alternativas de aeronaves. Fuente: propia.....	25
Tabla 3: Preselección de rutas. Matriz origen destino inicial. Fuente: propia	30
Tabla 4: Selección de rutas Matriz origen destino final. Fuente: propia	32
Tabla 5: Índice de congestión (IC) según hora y periodo. Fuente: propia.....	35
Tabla 6: Datos operador movilidad en periodo laborable. Fuente: Datos Orange.....	38
Tabla 7: Datos operador movilidad en periodo vacacional. Fuente: Datos Orange.....	38
Tabla 8: Probabilidades y costes de cada modo de transporte. Fuente: propia	53
Tabla 9: Probabilidades y costes de cada modo para cada ruta. Fuente: propia	56
Tabla 10: Probabilidades reales y calculadas de cada modo y ruta. Fuente: propia.....	60
Tabla 11: Datos de la situación futura. Fuente: propia	66
Tabla 12: Probabilidades en la situación actual y real. Fuente: propia	67
Tabla 13: Dimensionamiento de flota y factores de utilización. Fuente: propia	77
Tabla 14: Precios por pasajero y kilómetro. Fuente: propia	84

1. Glosario

AENA: Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea.

AAV: Autonomous Aerial Vehicles (vehículos aéreos autónomos).

DGT: Dirección General de Tráfico.

eVTOL: Electric Vertical Take-Off and Landing.

EASA: Agencia Europea de Seguridad Aérea.

FAA: Federal Aviation Administration.

IEA: International Energy Agency.

IMD: Intensidad Media Diaria de vehículos.

INE: Instituto Nacional de la Estadística.

OACI: Organización de Aviación Civil Internacional.

RENFE: Red Nacional de Ferrocarriles Españoles.

UAM: Urban Air Mobility.

VTC: Vehículo de Transporte con Conductor

VTOL: Vertical Take-Off and Landing

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

La congestión de las ciudades y la necesidad de cuidar el medio ambiente está generando nuevas formas de movilidad.

Durante los últimos años se ha tomado consciencia del gran impacto de los combustibles fósiles en la Tierra. Grandes empresas del motor y administraciones han centrado sus esfuerzos en reducir las emisiones y acabar con la dependencia de recursos no renovables.

La creación de vehículos eléctricos ya es una realidad. De igual manera que en unos años los coches autónomos serán una realidad más, ya se está trabajando de manera paralela en una línea de producto de altos vuelos.

La movilidad aérea no tiene el impedimento de una calzada sobre la cual circular. Así, el número de viajes podría aumentar de forma notable sin producir atascos. A todo esto, se le suman otras ventajas como, por ejemplo:

- Autonomía → se espera que los aerotaxis sean autónomos, aportando seguridad y evitando transportar carga extra.
- Trayectoria → la ruta será más rectilínea y a velocidad constante, reduciendo el consumo energético respecto al del desplazamiento rodado.
- Energía → un vehículo eléctrico requiere un coste energético menor.

Hay muchas otras, las cuales se irán viendo a lo largo del proyecto. Sin embargo, no todo son ventajas.

2.2. Motivación

La motivación principal a la realización de este proyecto es poder estimar la demanda de esta nueva forma de movilidad y poder diseñar un modelo operativo que optimice toda la logística para el transporte mediante vehículos eléctricos aéreos, con el objetivo de convertirlo en un proyecto real a largo plazo.

Para tener una idea de qué demanda tendría este proyecto si saliera adelante, hace falta analizar el tráfico entre diferentes lugares. ¿Qué rutas pueden tener sentido a partir de este estudio de tráfico? ¿Cuáles son las rutas más concurridas y cuánta gente las frecuenta y cuándo? ¿Qué usuarios escogerían el aerotaxi para desplazarse en vez de ir en vehículo privado, tren, avión u otros? ¿Tendrá esta ruta (o cualquier otra) una demanda homogénea?

El modelo operativo abarcará aspectos importantes como, por ejemplo: eficiencia y recarga de las baterías, sistema de reserva mediante una aplicación, entre otros. ¿Son todas las rutas origen-destino (vertipuerto¹ - vertipuerto)? ¿O sirven algunos destinos como parada? (vertipuerto – vertiparada² - vertipuerto).

Para ello, es necesario conocer previamente qué tipo de aeronaves existen en el mercado, su origen y sus características, así como sus especificaciones técnicas más relevantes.

El presente proyecto intentará dar respuesta a todas estas preguntas.

¹ El vertipuerto es el helipuerto para los aerotaxis.

² La vertiparada hace referencia a un helipuerto más pequeño donde puede aterrizar y despegar el aerotaxi de manera rápida, como si hiciera una pequeña parada, pero garantizando que puede cubrir todas las necesidades básicas para el vehículo aéreo, en caso de que fuera necesario.

3. Introducción

Los aerotaxis no son solo sueños de inventores, sino que también responden a una demanda real. Mucho tiempo se pierde en las carreteras cada día. El mundo del transporte evoluciona constantemente para cumplir con una demanda de movilidad cada vez más notoria. A la vez, no se debe perder de vista la contaminación medioambiental y la sobrecarga del tráfico.

Las ciudades se han ido adaptando a los cambios en el mundo del transporte, pero cada vez hay más restricciones para limitar atascos, ruido, y contaminación tanto en las zonas urbanas como en las interurbanas.

En este contexto, los aerotaxis aparecen como solución para incrementar radicalmente la movilidad urbana e interurbana, dándole una tercera dimensión al tráfico y consiguiendo, simultáneamente, reducir de forma drástica la congestión en la movilidad y la contaminación.

El objetivo es que las aeronaves permitan un transporte rápido, fiable y seguro entre diferentes ciudades cuyo trayecto esté muy concurrido ya sea por razones de trabajo, ocio u otras.

Diferentes empresas están desarrollando su propio eVTOL (Electric Vehicle Take-Off and Landing), pero aún falta dar el paso para su comercialización. Los escenarios más optimistas la prevén entorno al 2025.

Aunque el servicio pueda ser, en primera instancia, un servicio caro, el objetivo final es que a medida que los usuarios lo escojan como forma de movilidad con más frecuencia, el precio acabe siendo asequible para convertirse en una alternativa real a los medios de transporte convencionales.

De igual manera que otras aplicaciones de este ámbito permiten, se desea proponer un servicio accesible desde una app donde se pueda localizar un aerotaxi y reservarlo directamente. Esto se explicará con más detalle en el apartado dedicado al modelo operativo de las aeronaves.

3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es estimar la demanda del servicio que tendrá la nueva forma de movilidad: los aerotaxis.

El objetivo secundario es proponer un modelo operativo para poner en funcionamiento una red de aerotaxis.

Se escogerá una única ruta para llegar a la solución, tanto de la estimación de volumen de mercado como del modelo operativo. No obstante, los razonamientos que se siguen para llegar a los mismos son aplicables a cualquier otra ruta de las que se proponga en el proyecto.

Este objetivo se subdivide en una serie de pasos que permiten una mejor estructuración:

- Estudiar y analizar el mercado existente de aerotaxis (empresa, modelo de aeronave, fase actual del proyecto, regulación y normativas existentes para que los aerotaxis puedan volar; entre otras).
- Identificar las necesidades de los clientes frente a un servicio de aerotaxi.
- Realizar un estudio sobre aquellas rutas muy concurridas, en comunidades autónomas de España, donde este nuevo servicio pueda mejorar notablemente y optimizar diferentes aspectos.
- A partir del estudio de rutas, se selecciona una para realizar una estimación de la demanda y poder conocer qué cantidad de usuarios escogerían este modo de transporte.
- Convertir tanto las necesidades de los clientes como la estimación de la demanda en criterios prácticos para poder elaborar un modelo operativo y logístico del servicio de aerotaxis.

3.2. Alcance del proyecto

Este proyecto ofrece una solución para la congestión, contaminación y problemática general del transporte, brindando de esta manera una nueva movilidad que mejora en muchos aspectos.

El resultado del proyecto pretende llegar a los siguientes tipos de usuarios:

- Viajeros por trabajo: aquellos que realizan el viaje por motivos laborales. Pueden clasificarse en profesionales y directivos. Los profesionales eligen el aerotaxi porque este transporte les ofrece la posibilidad de conciliación entre su agenda personal y profesional. Estos son de nivel adquisitivo medio. Los directivos, que también buscan comodidad, y ahorro de tiempo, buscan en el servicio exclusividad, discreción y dar una imagen novedosa como empresa. Estos están dispuestos a asumir el coste del servicio (poder adquisitivo alto).

- Viajeros particulares: aquellos que realizan el viaje por motivos de ocio u otros motivos ocasionales. Pueden ser exclusivos o grupos. Mientras los exclusivos eligen el aerotaxi como opción de más calidad y lo reservan exclusivamente para ellos (poder adquisitivo medio-alto), los otros se agrupan para ahorrar costes en el viaje, pero buscan un precio que no supere mucho a las otras alternativas de transporte (poder adquisitivo medio).
- Otros tipos de viajeros: por ejemplo: emergencias médicas, entrega de paquetes, etc.

3.3. Limitaciones del proyecto

El tema escogido para el desarrollo del proyecto da mucho de sí y para estudiarlo exhaustivamente haría falta profundizar en muchos aspectos diferentes.

Dado que este tema tiene un alcance muy ambicioso, teniendo en cuenta que se trata de un servicio nuevo que requiere mucha inversión inicial y un tiempo de implantación elevado, se ha optado por reducir el alcance inicial del proyecto a España, al ser un país referente en cuanto a turismo, negocios, comercial, etc.

Tal y como se menciona en el apartado de los objetivos y como el propio título indica, el presente proyecto se centra en realizar una estimación de la demanda y desarrollar un modelo operativo para una red de aerotaxis entre diferentes ciudades españolas. Es por ello, que el trabajo tiene las siguientes limitaciones:

- Actualmente, no existe ninguna infraestructura dedicada al aterrizaje y despegue de los aerotaxis. Es por esto por lo que los vertipuertos en el presente proyecto no son infraestructuras exclusivamente construidas para el aterrizaje y despegue de los eVTOL, sino que se parte de la hipótesis de que son helipuertos situados en cada una de las ciudades sobre las cuales se establezcan rutas desde Barcelona.
- Establecer el mallado óptimo de vertipuertos no es objeto del proyecto. Por tanto, para este trabajo se estudiarán posibles rutas en función a otros criterios aplicados, los cuales se conocerán más adelante.
- El trabajo no detalla minuciosamente las normativas y certificaciones para los vuelos, ya que es un tema muy extenso del cual no hay mucha información aún. Solo se menciona en dos subapartados.
- Las cuantificaciones del modelo operativo, si hay algunas, son en líneas muy generales. Esto es debido a la poca cantidad de datos.

4. Aerotaxis

Un aerotaxi es un vehículo VTOL (Vertical Take-Off and Landing). Como sus siglas indican, es capaz de despegar y aterrizar de manera vertical. Esta tecnología surge gracias a importantes avances en la propulsión eléctrica. La denominación eVTOL existe para los vehículos de este tipo que son alimentados por energía eléctrica (Electric Vertical Take-Off and Landing).

Este dron de pasajeros tiene varios rotores y puede ser utilizado para mover personas (u otros; los cuales no se contemplan en este proyecto) entre dos puntos definidos. Los aerotaxis pueden ser pilotados manualmente por un piloto profesional, a distancia o automáticamente. No se deben confundir con los helicópteros. Aunque los helicópteros pueden tener varios rotores y pueden transportar personas; de igual manera que el VTOL; no están adaptados para entornos urbanos, ya que hacen mucho ruido y la manejabilidad cuesta más que la de un VTOL.

Los avances tecnológicos y técnicos en el desarrollo de los vehículos han producido cambios recientes en la industria de los aerotaxis desde finales de los años 90, cuando empezaron a ser ideados. No obstante, la mayoría de los proyectos actuales siguen en fase de desarrollo o *testing*, y podrían ser comercializados de cara a los próximos años.

La industria del aerotaxi es reciente, innovadora y con un fuerte potencial de comercialización. Así pues, se prevé un crecimiento muy rápido en la industria de este tipo de aeronaves. Sin embargo, habrá que esperar algunos años para que el servicio de las aeronaves eVTOL sea funcional. Esto depende en gran medida del grado de cumplimiento de las fases de ensayos y de la rapidez de obtención de la certificación de operación de los vehículos.

4.1. Estaciones de aerotaxis

Los vertipuertos son espacios de aterrizaje y despegue de drones tanto para labores de reparto de mercancía como transporte de personas a otros lugares. Un vertipuerto para una aeronave VTOL, es lo que es un helipuerto para el helicóptero.

Las diferencias que presentan los vertipuertos respecto a los aeropuertos o helipuertos tradicionales se mencionan a continuación:

- Permiten tener una red de ubicaciones diferentes mejorando escenarios urbanos existentes con una serie de configuraciones diferentes.

- No se consideran solamente como estaciones, sino también como centros de energía renovable, datos y servicios públicos.
- Se pueden diseñar como centros de oportunidad con instalaciones educativas y de salud, o incubadoras de negocios.
- Pueden servir para conectar áreas desfavorecidas de ciudades y áreas remotas sin la necesidad de una infraestructura costosa.
- Mejoran enormemente los tiempos de respuesta de emergencias.
- Permiten el salto tecnológico en los países en desarrollo, proporcionando una red de tránsito relativamente barata de crear en ciudades que nunca han desarrollado sistemas extensos de metro u otras modalidades de transporte.

El vertipuerto es un elemento clave en el avance de la aviación eVTOL. Actualmente, no existe ninguna infraestructura dedicada para el aterrizaje y despegue de los aerotaxis.



Figura 1: Vista aérea de un vertipuerto. Fuente: Ferrovial

Estos aeródromos, de tamaño pequeño, proporcionarán el espacio para las operaciones, pero también para la recarga eléctrica de las aeronaves. La mayoría de las empresas que diseñan aerotaxis son empresas exclusivamente aeronáuticas, especializadas en la creación y fabricación de vehículos y, por tanto, no se encargan de la parte operativa de estos.

Se prevé que existan dos tipos de vertipuertos diferenciados:

- A ras de suelo: en una superficie plana en el suelo prácticamente igual a los auténticos helipuertos. Será interesante en los desplazamientos a distancias medias, al exterior de las ciudades y hacia puntos de interés en los que no predomine la altura.
- Modelo urbano en altura: estará sobre edificios de gran estatura desde los que transportar personas y objetos.

El coste de construcción de un vertipuerto se estima entre los 5 y 10 millones de euros. La diferencia depende de múltiples variables. Si la plataforma tiene que estar elevada sobre el terreno, para reutilizar aparcamientos existentes, el coste se incrementa entre un 30 - 50 %.

Tal y como se ha mencionado en las limitaciones del proyecto, este no estudia en detalle los vertipuertos ni las variables que influyen y hacen fluctuar sus costes.

4.2. Regulación y normativas

Las aeronaves deberán cumplir tanto los requisitos técnicos como las características técnicas para obtener las certificaciones y poder volar. Las características técnicas son las que influyen en el diseño de la estación.

Los requisitos técnicos hacen referencia a todas las normativas que deberán cumplir las estaciones para obtener una certificación de operación. La colaboración de las agencias internacionales de regulación de la aviación civil es básica para obtener las certificaciones de vuelo de los aerotaxis. La referencia para reglamentos y normativas aeronáuticas es la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Los vehículos eVTOL son una innovación reciente y los vertipuertos no existen, por tanto no existe ningún reglamento explícito para sus estaciones.

La Agencia Europea de la Seguridad Aérea (EASA, por sus siglas en inglés) es el organismo esencial en la estrategia de seguridad aérea de la Unión Europea. Procura los niveles más elevados de seguridad y de protección del medio ambiente en la aviación civil en Europa. En Estados Unidos lo regula el Federal Aviation Administration (FAA).

Ya se ha publicado una propuesta por parte de la EASA sobre la futura regulación de los taxis aéreos. En esta misma se establece el marco legal al que estaría sujeto el tráfico y la explotación de este tipo de vehículos. Ya están pensando en otorgar licencias para comenzar la experimentación y desarrollo de esta nueva tecnología. No obstante, afirman que todavía hace falta resolver algunos problemas de sustentación y maniobrabilidad que podrían poner en riesgo la integridad de los pasajeros. Destacan el problema que tienen los actuales vehículos VTOL en caso de pérdida o mal funcionamiento de un motor: la dificultad para efectuar un descenso controlado en este caso.

Así pues, la EASA únicamente ha hecho una propuesta inicial básica, de la cual se espera recibir aportaciones para enriquecer el futuro marco regulatorio para la prestación de este tipo de servicios en el futuro.

Se estima que el regulador de aviación europeo certifique los aparatos y dé luz verde para poder volar en el año 2024.

4.3. Estudio de mercado

Aunque el término del aerotaxi parecía una locura hace años, la idea se va acercando cada vez más a la realidad. El mercado actual ya cuenta con diferentes prototipos, y sus fabricantes muestran cómo el interés y la confianza en el sistema han hecho posible desarrollar este nuevo concepto de movilidad como parte de la Movilidad Aérea Urbana (UAM).

4.3.1. Lilium Aviation

Lilium es una empresa alemana, fundada en 2015, líder en movilidad aérea urbana, y más concretamente, en el sector de la aviación con dron.

En el 2019 consiguieron realizar el primer vuelo de una versión funcional del diseño de su propio dron, el Lilium Jet.

El Lilium Jet es una aeronave tipo eVTOL que tiene una propulsión giratoria. Esta sirve para que la aeronave aterrice y despegue vertical y para que vuele en horizontal.

Los propulsores (36 rotores) cambian de posición girando alrededor de un eje horizontal. Está equipado con motores eléctricos de bajo impacto sonoro. Podrán volar en localidades de alta densidad de población y cubrir largas distancias. Tiene una capacidad de 5 personas. Algunas de sus especificaciones técnicas son que puede alcanzar una velocidad de 300 km/h y tiene un rango de 300 km. Por tanto, tiene una autonomía de una hora.

El próximo paso de Lilium es proponer un servicio completo de aerotaxis, que podría estar en funcionamiento en el año 2025.



Figura 2: Lilium Jet. Fuente: Lilium Aviation

- Acuerdo con Ferrovial

Ferrovial es uno de los principales grupos mundiales de infraestructuras y gestión de servicios urbanos. Tiene cuatro líneas de negocio: aeropuertos, autopistas, construcción y servicios.

La empresa tiene un Acuerdo con Lilium para instalar una red de vertipuertos en el estado de Florida. “La futura infraestructura es el recambio natural del helipuerto en el que pequeñas aeronaves eléctricas irán conviviendo con los helicópteros”. Además del transporte privado y de los aerotaxis, uno de los potenciales usos a futuro será el transporte colectivo de viajeros.

Ferrovial y Lilium irán de la mano en el diseño y construcción de estos emplazamientos, para posteriormente operar y mantener las instalaciones. Quieren abrir una red de 10 vertipuertos en EE. UU este año. La primera localización, como se ha mencionado anteriormente, estará ubicada en Florida.

Pretenden ofrecer viajes de alta velocidad, asequibles y libres de emisiones a millones de personas. Estiman que unos 20 millones de personas en Florida vivirán a media hora o menos de los vertipuertos, y que podrán beneficiarse los 140 millones de visitantes anuales que registra el Estado.

Ferrovial se asocia con diferentes empresas para desarrollar el concepto de la autopista conectada 5G y aporta la experiencia en la gestión de infraestructuras de transporte aéreo.

- Acuerdo con LuxAviation

Lilium se ha asociado con el operador de aeronaves comerciales para el desarrollo de operaciones comerciales con su avión eVTOL en Europa de cara al año 2024.

La aerolínea LuxAviation será la responsable de las operaciones: aprobaciones necesarias, gestión de los pilotos, formación de los pilotos, etc.

4.3.2. Joby Aviation

Joby Aviation es una empresa de transporte que posee, fabrica y explota aviones. En 2019 anunciaron el éxito de los vuelos de prueba con su propio eVTOL, el S4. Cuenta con 6 rotores y tiene 4 asientos. Alcanza una velocidad máxima de 320 km/h y tiene una autonomía de 240 km.



Figura 3: Joby S4. Fuente: Joby Aviation

- Acuerdo con Toyota

La compañía japonesa se alía con la empresa aeronáutica Joby. Mientras Toyota busca satisfacer las necesidades cambiantes de la sociedad, Joby trabaja en ofrecer desplazamientos aéreos seguros y asequibles. Ambos están explorando nuevas formas de movilidad aérea urbana que permitan el despliegue de servicios de transporte aéreo rápidos, silenciosos y asequibles. Están estudiando distintas tecnologías emergentes que puedan convertirse en alternativas de transporte viables y sostenibles. Juntamente con la empresa aeronáutica (Joby) están desarrollando aeronaves eVTOL que podrían convertirse en una solución sostenible para aliviar los problemas de movilidad de las zonas urbanas o entre distintas zonas urbanas.

4.3.3. Volocopter

Volocopter es una empresa alemana de taxis voladores pionera de la UAM. Inició su proyecto en el 2012 y en el 2016 obtuvo la certificación para volar. Su propio eVTOL, el Volocity, dispone de 18 rotores y 2 asientos, puede alcanzar una velocidad máxima de 100 km/h y tiene una autonomía de 27 km.



Figura 4: Volocity. Fuente: Volocopter

- Acuerdo con Geely

La idea de Volocopter es construir 150 aviones eléctricos VTOL para Aerofugia. Aerofugia se especializa en aplicaciones de drones y busca expandirse a la potencial industria de la UAM. Volocopter y Aerofugia han montado una empresa conjunta, subsidiaria de aviación de Geely³, para supervisar el lanzamiento de un servicio de taxi volador en China.

4.3.4. Airbus

Airbus es una empresa europea que diseña, fabrica y vende aviones civiles. Es el principal fabricante de aeronaves a nivel mundial. La empresa aeronáutica europea está estudiando la viabilidad de ciudades cuya movilidad se realice en vehículos voladores.

Airbus afirma que la clave para que el sistema de transporte novedoso avance reside en gran medida en los puertos verticales. Los resultados de su investigación prevén vertipuertos de diferentes tipos y tamaños, al igual que las paradas, estaciones y terminales de transporte tradicionales.

En 2016 inició su primer proyecto en relación con los eVTOL y en 2018 consiguió su primer vuelo de prueba.

Su aeronave, llamada Vahana, puede alcanzar una velocidad máxima de 230 km/h. Tiene una autonomía de 100 km. Vahana cuenta con 2 asientos y 8 rotores.

³ Geely es una empresa de producción automotriz multinacional de origen chino. Produce y vende vehículos de pasajeros bajo filiales de marcas muy conocidas.



Figura 5: Prototipo de los vertipuertos según Airbus. Fuente: Airbus



Figura 6: Airbus Vahana. Fuente: Airbus

4.3.5. EHang

Es una empresa china fundada en 2014. Su objetivo es ser líder y pionero en el sector de los vehículos aéreos autónomos (AAV por sus siglas en inglés).

La diferencia competitiva de la empresa es proponer directamente un vehículo autónomo, mientras que otras empresas proponen y diseñan, inicialmente, una aeronave con piloto.

A su vehículo lo denominaron EHang 184, que significa 1 pasajero, 8 hélices y 4 brazos. Su propulsión se realiza únicamente a través de las múltiples hélices horizontales. El EHang 184 puede alcanzar una velocidad máxima de 100 km/h y tiene una autonomía de 16 km. Con este hicieron numerosos ensayos entre 2015 y 2017.



Figura 7: EHang 184. Fuente: EHang

Luego desarrollaron una segunda versión de su aeronave, denominada EHang 216, que puede acoger a 2 pasajeros y tiene 16 hélices. Puede alcanzar una velocidad máxima de 130 km/h y puede tener una autonomía de 35 km. En el año 2018 realizaron un vuelo test con este modelo.



Figura 8: EHang 216. Fuente: EHang

A continuación, se muestra una tabla resumen⁴ que recoge las especificaciones técnicas más importantes a tener en cuenta, con el objetivo de disponer de los datos sintetizados y esquematizados de cara a los próximos apartados del proyecto.

⁴ Se ha añadido la información acerca tres empresas más que se han encontrado: Bartini, Bell y AirSpaceX, con sus correspondientes vehículos.

Empresa	Nombre del vehículo	Fecha inicio de proyecto	Fuente de energía	Velocidad máxima (km/h)	Rango máximo ⁵ (km)	Número de rotores	Número de asientos
Lilium Aviation	Lilium Jet	2019	Eléctrica	300	300	36	5
Joby Aviation	Joby S4	2019	Eléctrica	320	240	6	4
Volocopter	Volocity	2012	Eléctrica	100	27	18	2
Airbus	Vahana	2016	Eléctrica	230	100	8	2
EHang	EH 184	2015	Eléctrica	100	16	8	1
EHang	EH 216	2017	Eléctrica	130	35	16	2
Bartini	Flying car	2015	Eléctrica	300	150	8	2 ó 4
Bell	Nexus	2017	Híbrida	290	240	6	5
AirSpaceX	Mobi-One	2017	Híbrida	240	420	4	5

Tabla 1: Especificaciones técnicas de diferentes eVTOL. Fuente: propia

El resto de los apartados del trabajo se realizarán teniendo en cuenta el modelo de una sola aeronave de las anteriormente descritas.

El criterio para seleccionarla es dar un factor de peso a cada una de las especificaciones técnicas siguientes: velocidad máxima, rango máximo y número de asientos; según su importancia en el proyecto. Cada uno de los modelos se puntuará con un factor del 1 al 5 según cumplan con las prioridades; siendo 1 el menor cumplimiento y 5 el mayor.

El análisis se ha realizado de manera subjetiva, y la asignación de pesos a cada criterio también. Por orden de prioridad, importan más:

⁵ Rango máximo hace referencia a la autonomía considerando la máxima carga.

1. El número de rotores, ya que proporcionan sustentación sin que la aeronave se desplace y de esta forma, permiten realizar despegues y aterrizajes verticales. Por tanto, es un factor que contribuye a la seguridad de la aeronave y se le asignará un factor de peso del 40%.
2. La autonomía, debido a que, a más autonomía, más opción de rutas se tendrá. Por tanto, se le asignará un factor de peso del 30%.
3. El número de asientos, ya que cuantas personas quepan, más optimización del viaje y menor coste por persona. Por tanto, se le asignará un factor de peso del 20%.
4. La velocidad máxima, ya que el tiempo de viaje será menor. No obstante, no es lo más importante y por eso se le asigna un factor de peso del 10%.

El resto de los datos sobre cada modelo (*en la Tabla 1*) se han añadido a modo informativo, sin influir en el análisis.

	Factor de peso	Lilium	Joby	Volocopter	Airbus	EHang		Bartini	Bell	AirSpaceX
						184	216			
Número de rotores	40%	5	1	3	1	1	3	1	1	1
Rango máximo (km)	30%	4	4	1	3	1	1	3	4	5
Velocidad máxima (km/h)	20%	4	5	1	3	1	1	4	4	3
Número de asientos	10%	5	4	2	2	1	2	2	5	5
Resultado	100%	4,5	3	1,9	2,1	1	1,9	2,3	2,9	3

Tabla 2: Tabla de puntuaciones de las alternativas de aeronaves⁶. Fuente: propia

Como se puede observar, la aeronave seleccionada para los siguientes capítulos del proyecto será el Lilium Jet, de la empresa Lilium Aviation, con las siguientes características: 36 rotores, autonomía de 300 km, velocidad máxima de 300 km (a plena carga) y 5 asientos.

⁶ La justificación de la elección se puede ver en el Anexo 1.

5. Estimación de la demanda

Volar en aerotaxi supondrá ahorrarse la peor parte de los aeropuertos (colas en la facturación, en los controles). Además de ganar tiempo en tierra, el cliente disfrutará en pleno vuelo de una serie de ventajas que hacen que le compense pagar el precio de un taxi volador:

- Elegir el horario que más le convenga.
- Presentarse solo un cuarto de hora antes de la salida.
- Librarse de los problemas de *overbooking* y pérdida o extravío de equipajes.
- Un aerotaxi puede aterrizar en más de 2.000 aeropuertos y aeródromos europeos, frente a los 200 de los que disponen las compañías comerciales.
- Permiten una total discreción, de manera que el anonimato está garantizado.
- Para algunos usuarios viajar en aerotaxi da un plus de seguridad, ya que no comparten avión con personas desconocidas. No es un medio masivo, ya que podría transportar entre 2-5 personas⁷ por aeronave.

No obstante, esta nueva forma de movilidad también tiene sus barreras, algunas explicadas a continuación:

- Tecnológica:

Diseñar un aerotaxi eléctrico es un desafío de eficiencia y seguridad. Se deben crear una serie de estándares para orientar los esfuerzos en las plataformas y adecuar las infraestructuras para atender a estas aeronaves, para que las operaciones puedan desarrollarse con plena seguridad.

La industria debe ir abriendo camino para generar negocio y ampliar las operaciones con elevadas cuotas de seguridad. Es necesario no solo demostrar que el aerotaxi puede aterrizar y despegar de forma vertical con una propulsión distribuida, sino que también diseñar y desarrollar un mallado intermodal de vertipuertos, donde las baterías puedan recargarse ahí rápidamente.

El reto de esta tecnología se centra en la ciberseguridad, ya que el ser humano no gestionará nada. Se automatizará el tráfico aéreo y del aerotaxi y se diseñarán y mejorarán los algoritmos de las futuras rutas aéreas logísticas.

⁷ Según los datos técnicos de las aeronaves que se mencionan en este proyecto. Ver la *Tabla 1*.

- Regulatoria:

Este tipo de vehículos deben respetar criterios estrictos de seguridad para cumplir con la regulación y obtener las certificaciones oficiales para volar.

La regulación debe ser adecuada en tiempo y forma sin ahogar al sector, manteniendo la seguridad. Es necesario un marco normativo que permita una implantación eficiente y segura.

- Económica:

Puede poner en duda la utilidad como alternativa al tren, avión o coche, ya que es un medio, inicialmente, para gente de alto poder adquisitivo. Se debería realizar un estudio de la viabilidad económica con más detalle, el cual no abarca este proyecto.

No obstante, la forma de movilidad del aerotaxi no se entiende como algo *premium*, sino algo que se lo pueda permitir todo el público. La idea es empezar marcando un precio elevado y, a medida de la gente lo coja con más frecuencia, acabar rebajando el precio a más de la mitad.

El precio varía según el destino y, por ahora, hace que sea un servicio alejado del ciudadano medio. Es aún un servicio en período de desarrollo, por lo que muchos aeropuertos carecen de las infraestructuras necesarias para permitir las operaciones de este tipo de vuelos, ya que no disponen de la capacidad suficiente y habría que evitar la saturación causada por el rápido crecimiento de las operaciones.

- Psicológica:

Hay que convencer a la gente para que este nuevo medio de transporte sea acogido tanto por las municipalidades, como por los futuros viajeros.

Se deberá invertir en los nuevos sistemas y tecnología con tal de conseguir la confianza de los futuros usuarios. La percepción de riesgo debe ser imperceptible, al competir con otros medios de transporte en corta distancia. Hay que convencer a la sociedad del avance que supone este nuevo sistema de movilidad.

5.1. Rutas

Sin perder de vista el objetivo del proyecto, que es realizar una estimación de la demanda y definir un modelo operativo, es necesario previamente conocer una estimación del volumen de mercado para el lugar de implantación del servicio.

Antes de estimar este volumen, debe realizarse un estudio preliminar de las rutas posibles. Para definir estas rutas se necesita realizar, en primer lugar, algún filtrado para la elección de las ciudades. Se decide filtrar atendiendo a los siguientes criterios:

1. Ciudades con más de 100.000 habitantes.
2. Ciudades con una renta per cápita más elevada.

A partir de un estudio publicado por la INE⁸, se dispone del listado de las provincias de España con más de 100.000 habitantes. Entre esas ciudades, se seleccionan aquellas que tengan una renta per cápita más elevada, cifras también obtenidas de unas estadísticas realizadas por la INE⁹.

Con estos filtrados, entran como candidatas las siguientes 27 ciudades:

- Alicante
- Barcelona
- Bilbao
- Castellón
- Córdoba
- Girona
- Gijón
- Granada
- Ibiza
- La Coruña
- Las Palmas de Gran Canaria
- Madrid
- Málaga

⁸ Disponible en el Anexo 13 (población).

⁹ Disponible en el Anexo 13 (renta).

- Murcia
- Oviedo
- Palma de Mallorca
- Pamplona
- San Sebastián
- Santa Cruz de Tenerife
- Santiago de Compostela
- Sevilla
- Tarragona
- Valencia
- Valladolid
- Vigo
- Vitoria
- Zaragoza

En realidad, muchas de estas ciudades coinciden con las que tienen más tráfico y movimiento de pasajeros en sus respectivos aeropuertos¹⁰. A partir de estas ciudades, se establecen las rutas.

Para tener idea de qué rutas se pueden proponer inicialmente, se han consultado datos de AENA para conocer qué trayectos son los más frecuentados en avión. También se han consultado datos de RENFE, y de las rutas más habituales con su flota de trenes de media distancia y/o alta velocidad.

A partir de este primer filtrado han salido un total de 146 rutas¹¹. Estas se presentan en la tabla a continuación:

¹⁰ Datos extraídos de AENA disponibles en el Anexo 7.

¹¹ Preselección de rutas disponible en el Anexo 2.

Alicante	Barcelona	Bilbao	Castellón	Córdoba	Gijón	Girona	Granada	Ibiza
Valencia Murcia Granada Castellón	Valencia Sevilla Pamplona Zaragoza Madrid Palma de Mallorca Ibiza Santiago de Compostela Castellón Málaga Bilbao Tarragona Girona	Zaragoza Barcelona Valladolid Gijón Oviedo Vitoria Madrid San Sebastián	Barcelona Valencia Zaragoza Murcia Alicante Tarragona	Madrid Sevilla Málaga Granada	Bilbao Valladolid Vigo Vitoria La Coruña San Sebastián Santiago de Compostela	Barcelona Tarragona	Sevilla Málaga Murcia Alicante Córdoba	Barcelona Valencia Palma de Mallorca
La Coruña	Gran Canaria	Madrid	Málaga	Murcia	Oviedo	Palma de Mallorca	Pamplona	San Sebastián
Vigo Gijón Oviedo Santiago de Compostela	Tenerife	Barcelona Valencia Zaragoza Córdoba Valladolid Bilbao Palma de Mallorca Sevilla Málaga Santiago de Compostela Pamplona Vitoria	Sevilla Madrid Córdoba Barcelona Granada	Valencia Alicante Granada Castellón	Bilbao Valladolid Vigo Vitoria La Coruña Santiago de Compostela	Barcelona Valencia Madrid Ibiza	Madrid Barcelona	Zaragoza Bilbao Valladolid Gijón Vitoria
Tenerife	Santiago C.	Sevilla	Tarragona	Valencia	Valladolid	Vigo	Vitoria	Zaragoza
Gran Canaria	Vigo Barcelona Gijón Madrid La Coruña Oviedo	Málaga Madrid Barcelona Córdoba Granada	Barcelona Valencia Zaragoza Castellón Girona	Madrid Barcelona Zaragoza Murcia Palma de Mallorca Ibiza Alicante Castellón Tarragona	Madrid Bilbao Gijón Vitoria Oviedo San Sebastián	Gijón La Coruña Oviedo Santiago de Compostela	Madrid Zaragoza Valladolid Gijón Oviedo San Sebastián Bilbao	Madrid Barcelona Valencia Bilbao Vitoria San Sebastián Castellón Tarragona

Tabla 3: Preselección de rutas. Matriz origen destino inicial. Fuente: propia

Hace falta recalcar que:

- Hay rutas que directamente no se han planteado, aunque sean habituales, porque es muy evidente que la distancia entre origen y destino es considerablemente superior a los 300 km.
- Podrían haberse planteado otras rutas, pero este proyecto ofrece estas.

No obstante, estas no serán las rutas definitivas que se proponen para el proyecto. Como se ha ido diciendo, se debe comprobar que entre el origen y destino haya una distancia de mínimo 50 km y máximo 300 km, ya que 300 km es la máxima autonomía del aerotaxi, Lilium Jet, tal y como se ha visto en las especificaciones en el capítulo anterior.

La distancia entre origen y destino se calcula teniendo en cuenta la distancia más corta, en línea recta, ya que es la distancia de las líneas aéreas.

A partir del diseño inicial de estas (*Tabla 3*) se calcula la distancia en línea recta entre cada origen y cada destino. Se ha considerado un margen de error del 3%, ya que el sitio web¹² en el cual se calculan estas distancias tiene en cuenta los centros de las respectivas ciudades. No obstante, este proyecto no abarca la colocación ni ubicación de los helipuertos en cada una de las ciudades objeto de estudio. Si se considera que el aerotaxi aterriza y despegue desde un helipuerto, se puede aceptar este pequeño error de kilometraje.

Respecto a la autonomía de los aerotaxis y la distancia calculada, la aplicación de cálculo ya tiene en cuenta el peor escenario en relación con las velocidades de los diferentes vientos, por tanto, se acepta el valor que esta calcula y se da por válido para el estudio.

Así pues, se han obtenido un total de 122 rutas¹³.

Una vez más, cabe destacar que podrían haberse planteado otras rutas, pero que a partir del filtrado realizado y de los criterios seguidos se ha llegado a esta solución (y que esta no es única).

¹² Distancia calculada con: <https://www.distance.to/>

¹³ Selección de rutas y cálculo de distancias disponible en el Anexo 2.

La matriz de orígenes y destinos se presenta a continuación:

Alicante	Barcelona	Bilbao	Castellón	Córdoba	Gijón	Girona	Granada	Ibiza
Valencia Murcia Granada Castellón	Valencia Zaragoza Palma de Mallorca Ibiza Castellón Tarragona Girona	Zaragoza Valladolid Gijón Oviedo Vitoria San Sebastián	Barcelona Valencia Zaragoza Murcia Alicante Tarragona	Madrid Sevilla Málaga Granada	Bilbao Valladolid Vigo Vitoria La Coruña San Sebastián Santiago de Compostela	Barcelona Tarragona	Sevilla Málaga Murcia Alicante Córdoba	Barcelona Valencia Palma de Mallorca
La Coruña	Gran Canaria	Madrid	Málaga	Murcia	Oviedo	Palma de Mallorca	San Sebastián	Tenerife
Vigo Gijón Oviedo Santiago de Compostela	Tenerife	Valencia Zaragoza Córdoba Valladolid Vitoria	Sevilla Córdoba Granada	Valencia Alicante Granada Castellón	Bilbao Valladolid Vigo Vitoria La Coruña Santiago de Compostela	Barcelona Valencia Ibiza	Zaragoza Bilbao Valladolid Gijón Vitoria	Gran Canaria
Santiago de Compostela	Sevilla	Tarragona	Valencia	Valladolid	Vigo	Vitoria	Zaragoza	-
Vigo Gijón La Coruña Oviedo	Málaga Córdoba Granada	Barcelona Valencia Zaragoza Castellón Girona	Madrid Barcelona Zaragoza Murcia Palma de Mallorca Ibiza Alicante Castellón Tarragona	Madrid Bilbao Gijón Vitoria Oviedo San Sebastián	Gijón La Coruña Oviedo Santiago de Compostela	Madrid Zaragoza Valladolid Gijón Oviedo San Sebastián Bilbao	Madrid Barcelona Valencia Bilbao Vitoria San Sebastián Castellón Tarragona	-

Tabla 4: Selección de rutas Matriz origen destino final. Fuente: propia

5.2. Elección de la ruta

Para realizar las futuras partes del proyecto, se decide seleccionar una ruta y estudiar tanto el tráfico como la congestión a partir de esta. La estimación de la demanda también se hará sobre esta misma ruta.

Se decide seguir esta metodología ya que los razonamientos y pasos a seguir son iguales para todas las rutas. En cambio, la cantidad de datos para un total de 122 rutas es totalmente extensa.

Para poder realizar un estudio exhaustivo, se ha decidido seleccionar una ruta a la que se pueda llegar por 3 medios de transporte diferentes: coche, tren y avión.

Por eso, se selecciona la ruta de Barcelona-Valencia. Esta ruta es muy frecuentada y se puede llegar de al menos tres formas diferentes. Como se verá más adelante, en el estudio de congestión, es una ruta que a ciertas horas concentra muchos vehículos y, por tanto, la existencia de una nueva forma de movilidad como es el aerotaxi mejoraría notablemente el tráfico de esta.



Figura 9: Señalización gráfica de la ruta. Fuente: propia

5.3. Estudio de congestión

La congestión es un problema que sigue agravándose, constituyendo un peligro sobre la calidad de la vía urbana. Algunos de sus efectos negativos son los siguientes:

- Pérdida de tiempo
- Retrasos
- Aumento de gasto de combustible
- Desgaste de los vehículos (por la ralentización en el tráfico y la frecuencia de aceleración y frenado).
- Problemática en caso de emergencias (dificultad de paso).
- Aumento de tráfico en carreteras secundarias o rutas alternativas a las que están afectadas por la congestión.

Los impactos de la congestión, tanto inmediatos como a largo plazo, exigen esfuerzos multidisciplinarios para mantenerla bajo control, no siendo sencillo encontrar las soluciones más indicadas. Todo señala a que debe intentarse un conjunto de acciones sobre la oferta de transporte, así como sobre la demanda, a fin de racionalizar el uso de las vías públicas.

El objetivo de este apartado es analizar en qué momentos del día el tráfico impacta en el tiempo de duración de la ruta Barcelona – Valencia. De esta manera, el servicio de aerotaxis es una ayuda para reducir la congestión en este trayecto.

Se ha realizado un estudio¹⁴ que mide la duración del trayecto a cada hora del día en cada uno de los días de los dos periodos anteriormente explicados (noviembre y agosto 2019).

Los datos están extraídos de hacer consultas a la API de Google Maps, con el objetivo de poder establecer un índice de congestión y ver en qué rangos de tiempo se encuentran los picos de demanda.

Se establece un índice de congestión del 100% si el tráfico supera por más de un 30% el tiempo del trayecto sin tráfico.

¹⁴ Datos disponibles en el Anexo 3.

Una vez se han agrupado los datos de los diferentes días por horas y por periodos, se obtienen los siguientes resultados:

Tipo periodo	Laborable	Vacacional
Hora	Promedio IC	Promedio IC
7:00	77,52%	76,84%
8:00	75,83%	76,17%
9:00	80,73%	83,32%
10:00	85,14%	84,57%
11:00	88,02%	87,57%
12:00	86,73%	86,74%
13:00	94,47%	93,99%
14:00	93,91%	93,45%
15:00	91,29%	90,16%
16:00	87,79%	87,23%
17:00	84,07%	84,74%
18:00	84,07%	83,95%
19:00	82,37%	82,60%
20:00	80,79%	80,68%
21:00	74,59%	75,27%
22:00	70,19%	70,07%
23:00	70,64%	69,17%
00:00	59,06%	61,05%

Tabla 5: Índice de congestión (IC) según hora y periodo. Fuente: propia

Como se puede observar, el índice de congestión es muy parecido entre los dos periodos.

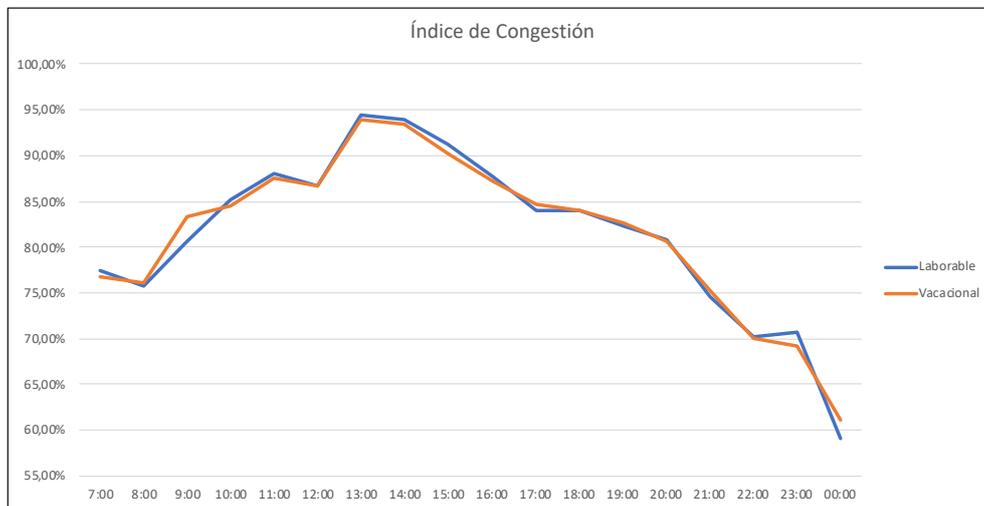


Gráfico 1: Índice de congestión según hora del día y periodo. Fuente: propia

Se puede observar cómo a partir de las 8:00h va aumentando la congestión hasta las 15:00h, habiendo el pico de máxima demanda aproximadamente a la 13:00h. A partir de las 16:00h se puede ver cómo va decreciendo. No obstante, es una ruta que está bastante congestionada a lo largo del día y, por tanto, el servicio de aerotaxi deberá asumir parte de la demanda para poder descongestionar la vía pública.

5.4. Estudio de movilidad

El fin de realizar un estudio de movilidad previo a un estudio de demanda es conocer cuánta gente se desplaza entre el origen y el destino, para tener posteriormente un volumen orientativo de pasajeros que escogería el aerotaxi, en vez de todas las otras alternativas, para desplazarse.

Si se quiere realizar el estudio con cualquiera de las otras rutas, es evidente que todos los datos serán diferentes, y por tanto el proceso desde el punto de vista analítico (en cuanto a números) será diferente. Pero el proceso deductivo y los pasos a seguir son los mismos en cada una de las rutas que se quisiera estudiar.

Como se ha mencionado anteriormente, de Barcelona a Valencia se puede llegar, principalmente, de tres formas diferentes: en vehículo privado, en tren o en avión. A partir de la información pública, se observa que hay datos disponibles (en cuanto a volumen de pasajeros que hacen estas rutas) de avión, a partir de AENA y de coche, a partir de la DGT. No obstante, no hay datos de RENFE, ya que la empresa considera que deben ser confidenciales.

Es por esta razón por la cual se deben conocer datos totales de movilidad, para poder realizar una estimación del volumen de pasajeros que escoge el tren como modo de transporte y así estimar un porcentaje de cada forma de movilidad en la situación actual.

Estos datos se obtienen a partir de un operador de telefonía, concretamente de Orange. Cabe mencionar que la población española que tiene contratado su servicio móvil con Orange en la ciudad origen representa el 30% de la población total. Como estas cantidades no son válidas para realizar un estudio real, los datos existentes se han escalado al total de la población.

Los datos solicitados son del año 2019, ya que posteriormente el COVID-19 amenazó al sector del transporte.

Para tener variabilidad en los resultados y muestras significativas, se divide el estudio según dos periodos: vacacional y laborable. No se pueden considerar las semanas laborables cuando incluyen un festivo, ya sea nacional o regional, puesto que alteran la distribución de los desplazamientos. Por tanto, se ha escogido un periodo laborable en el que no hay días laborables festivos.

Las fechas solicitadas comprendidas en cada uno de los periodos son las siguientes:

- Periodo laborable → se elige el periodo comprendido entre el 11 y el 24 de noviembre de 2019.
- Periodo vacacional → se elige el periodo comprendido entre el 5 y el 18 de agosto de 2019.

Los desplazamientos se dividen según dos franjas horarias:

- Franja viaje diurna → divididos en franjas de dos horas: 7:00-9:00, 9:00-11:00, 11:00-13:00, 13:00-15:00, así hasta la 1:00 de la mañana.
- Franja viaje nocturna → de 1:00 a 7:00. Esta franja no se ha tenido en cuenta en este estudio, ya que el volumen de desplazamientos en la franja diurna es mucho más elevado al de la franja nocturna, por eso este se considera despreciable en el estudio.

Los presentes datos contabilizan un desplazamiento entre las dos ciudades si hay una estancia continuada de al menos 3 horas en el origen y el destino ya que, sino, se considera que puede ser una parada.

5.4.1. Datos de movilidad total – Orange

Se tienen datos totales (incluyen todas las modalidades de transporte, escalado al 100% de la población) del volumen de movilidad del trayecto Barcelona – Valencia, para cada uno de los días comprendidos en estos dos periodos, incluyendo tres días tipo en cada uno de ellos: días laborables, sábados y domingos.

El estudio en periodo laborable (del 11 al 24 de noviembre de 2019) busca emular la movilidad estándar sin afectaciones externas como los días festivos, puentes, vacaciones escolares, etc.

Fecha	Inmovilidad	Tipo de día	Periodo	Origen	Destino	Volumen
11/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	1947
12/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2110
13/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2325
14/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2256
15/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	3683
16/11/19	3h	Sábado	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2088
17/11/19	3h	Domingo	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2335
18/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2704
19/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	1751
20/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2178
21/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2010
22/11/19	3h	Día Laborable	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	3429
23/11/19	3h	Sábado	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	2270
24/11/19	3h	Domingo	Fuera de Vacaciones	Barcelona	Valencia	1961
TOTAL						2360,5

Tabla 6: Datos operador movilidad en periodo laborable. Fuente: Datos Orange

Como se puede observar, una media de 2.360 pasajeros fue desde Barcelona hasta Valencia en el periodo de noviembre de 2019.

El estudio en periodo vacacional (del 5 al 18 de agosto de 2019) busca capturar el máximo de las variaciones de movilidad debidas a la estación de verano y especialmente las operaciones salida y retorno.

Fecha	Inmovilidad	Tipo de día	Periodo	Origen	Destino	Volumen
5/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2865
6/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2454
7/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2617
8/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2364
9/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2887
10/8/19	3h	Sábado	Vacaciones	Barcelona	Valencia	3274
11/8/19	3h	Domingo	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2698
12/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2781
13/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2366
14/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2649
15/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2440
16/8/19	3h	Día Laborable	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2457
17/8/19	3h	Sábado	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2132
18/8/19	3h	Domingo	Vacaciones	Barcelona	Valencia	2393
TOTAL						2598,4

Tabla 7: Datos operador movilidad en periodo vacacional. Fuente: Datos Orange

Como se puede observar, el volumen medio total de desplazamientos es de 2.598 pasajeros para el periodo de agosto de 2019.

Como la variación de volumen entre los dos periodos es ínfima, se puede afirmar que cada día una media de **2.479** pasajeros hace la ruta Barcelona – Valencia.

5.4.2. Datos de movilidad coches – DGT

Para estimar la demanda en esta forma de movilidad se realizan las siguientes hipótesis:

- La ruta más factible entre origen y destino es la más rápida entre las posibles rutas.
- Se descartan carreteras nacionales y se escogen, prioritariamente, autopistas y autovías.
- A partir del dato público de la DGT de tráfico por tramos, se calcula el tráfico medio de la carretera entre origen y destino.

Entre Barcelona y Valencia en coche hay, aproximadamente, 350 km. La ruta señalizada por Google Maps se muestra a continuación:

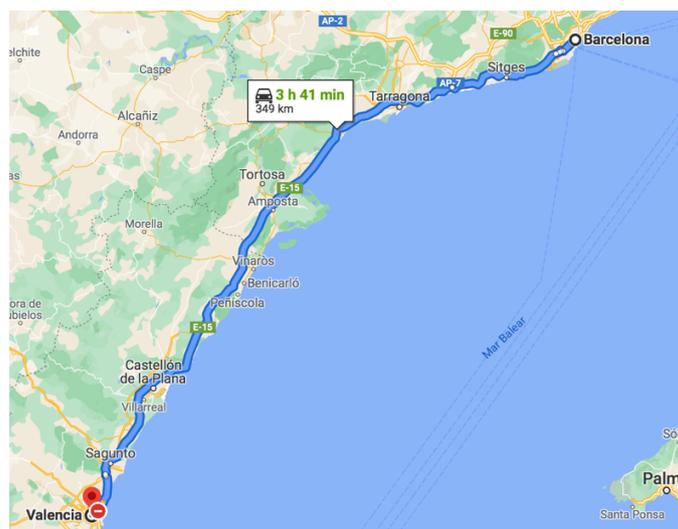


Figura 10: Ruta Barcelona - Valencia en coche. Fuente: Google Maps

A partir del mapa de tráfico de la DGT¹⁵ del año 2019, se puede conocer cuántos vehículos transitan las carreteras (con el coche o con la moto) para ir de Barcelona a Valencia.

¹⁵ Mapa disponible en el Anexo 5.

El mapa mide la Intensidad Media Diaria de vehículos (I.M.D) durante los 365 días del año y da el valor medio. Aunque no se puede conocer el volumen por estacionalidad, al ser la I.M.D un dato medio, ya tiene en cuenta las fluctuaciones en un año entero: vacaciones, trabajo, etc. Por tanto, es un dato válido para el estudio.



Figura 11: Leyenda I.M.D vehículos. Fuente: mapa de tráfico de la DGT

El mapa, aparte de dar la intensidad media diaria de vehículos, ofrece un porcentaje que indica, sobre esa I.M.D, cuántos son motos, cuántos, vehículos ligeros y cuántos, vehículos pesados. Para este estudio no se tienen en cuenta los vehículos pesados, ya que los camiones no son, para el objeto de estudio, potenciales clientes para el servicio de aerotaxis. Por tanto, este porcentaje aproximado quedará excluido del estudio.

Si se analiza el mapa de tráfico que ofrece la DGT, habría que dividir el estudio en tres tramos diferentes y hacer una media ponderada de la I.M.D total teniendo en cuenta los km de cada tramo, y de cada subtramo si aplica. Pero el problema de hacer esto es que no todos los vehículos que pasan por un tramo hacen la ruta de Barcelona-Valencia. Pueden ir por esa carretera porque les va de paso, y porque vienen o van a otro sitio. Y lo que realmente interesa es cuánta gente llega a Valencia desde Barcelona.

Todos los vehículos que van desde A hasta B pasan por todos los tramos. Por eso, se escoge el tramo que tenga la mínima I.M.D, porque esos vehículos seguramente hacen esa ruta.

Si miramos el mapa atendiendo a este criterio, observamos que el tramo que concentra menos vehículos (tramo de color verde) tiene una I.M.D que fluctúa entre los 10.001 y los 15.000 vehículos/día. Tomamos el valor medio entre los dos extremos, obteniendo así una I.M.D de 12.500 vehículos/día.

Antes de acabar, aún hace falta realizar algunos cálculos para ajustar los resultados y que se aproximen lo máximo posible a la realidad.

En primer lugar, y como se ha dicho anteriormente, se deben excluir del estudio aquellos vehículos pesados. Si se observa el mapa del tráfico (de la DGT), se observa el porcentaje es muy variable en cada uno de los tramos, pero en el tramo en el que se estaba mirando la mínima I.M.D de la ruta, es aproximadamente del 20%.

Para validar este dato, se ha consultado un estudio realizado en el 2019¹⁶ que muestra los datos de tráfico en las autopistas, dando a conocer la cantidad de vehículos pesados que transitan en estas. Se ha mirado la media anual tanto de las rutas Barcelona-Tarragona como Tarragona-Valencia; ambos tramos de la AP-7. El porcentaje de vehículos pesados es del 20% y 29%; respectivamente. Por eso, se decide establecer una aproximación del 25%. De esta manera, la I.M.D = 9.375 vehículos/día.

Hay que tener en cuenta que el mapa mide la intensidad en las carreteras en ambos sentidos (Barcelona-Valencia y Valencia-Barcelona). Como este estudio solo se centra en el sentido Barcelona – Valencia, se tiene que ajustar la I.M.D únicamente al trayecto de ida. Para estimar un porcentaje de viajes de ida y vuelta, se cogen los datos del operador móvil y se mira el volumen medio de rutas de ida (2.479 pasajeros/día) y el volumen medio de rutas de vuelta (2.490 pasajeros/día). Como la diferencia entre ambas es de menos del 1%, se da como válida la suposición de que en la carretera ocurrirá lo mismo y que, por tanto, hay el mismo volumen de vehículos en la ruta Barcelona-Valencia que en la ruta en sentido contrario. Por tanto, el valor de la I.M.D se reduce en un 50%, siendo I.M.D = 4.687 vehículos/día.

No todos los vehículos que incluye la I.M.D que da el mapa hacen la ruta exacta Barcelona-Valencia. Por tanto, de este total se estima que el 30%¹⁷ va de punto A a punto B. De esta manera, la I.M.D = 1.406 vehículos/día.

Por último, y para tener una estimación consistente, es necesario un buen modelo de traducción de vehículos a personas. A este efecto se ha utilizado, una ocupación de 1,1 pasajeros/vehículo¹⁸; siendo así la demanda total en coche de 1.546 pasajeros/día.

¹⁶ Estudio disponible en el Anexo 6.

¹⁷ Estimación hecha en base a consulta de datos de I.M.D de peajes.

¹⁸ Ratio de ocupación establecida según la IEA, 1997. Fuente: Transportes, UPC, ETSEIB.

5.4.3. Datos de movilidad avión – AENA

Para conocer el volumen de tráfico aéreo de la ruta: Barcelona – Valencia, se consulta la base de datos de AENA, disponible en su página web, en ese mismo periodo (mes y año), filtrado por tráfico nacional y por grupo indicador: pasajeros, dejando de contemplar en el estudio aquellos vuelos destinados a las operaciones, mercancías y correos.

El *dataset* de AENA¹⁹ ofrece los datos por meses, por lo que, en primer lugar, se han consultado los del mes de noviembre para tener una idea del tráfico en periodo laborable.

El volumen medio en esos días de noviembre de 2019 fue de 3.567 pasajeros. Teniendo en cuenta que el mes de noviembre tiene 30 días y bajo la hipótesis de que la demanda es homogénea en los días, se estima que 118,9 pasajeros/día escogieron el avión para ir de Barcelona a Valencia en noviembre del 2019.

Para conocer el volumen de tráfico aéreo de la ruta en agosto, se procede de igual manera.

A partir del *dataset* de AENA²⁰, a partir del cual se obtienen los datos mensuales, filtra por mes de agosto de 2019 para que la comparación sea igual que en las otras formas de movilidad.

El volumen de pasajeros en agosto de 2019 fue de 3.171 pasajeros. Teniendo en cuenta que el mes de agosto tiene 31 días y bajo la hipótesis de que la demanda es homogénea en los días, se estima que 102,3 pasajeros/día escogieron el avión para ir de Barcelona a Valencia en agosto del 2019.

Para obtener un dato significativo, se realiza la media aritmética entre ambos y se estima que 110 pasajeros/día escogen el avión para ir de Barcelona a Valencia.

¹⁹ Dataset de AENA para los datos de noviembre de 2019. Disponible en el Anexo 7.

²⁰ Dataset de AENA para los datos de agosto de 2019. Disponible en el Anexo 7.

5.4.4. Datos de movilidad tren – RENFE

El mundo del transporte de los pasajeros y, concretamente la planificación del transporte, ofrece modelos para poder estimar la demanda que hay en los modos de transporte entre origen y destino. Para este caso, se aplica el Modelo Logit. Este modelo sirve para determinar el repartimiento modal en cada una de las formas de transporte, es decir, como se reparten los viajes en los diferentes modos posibles.

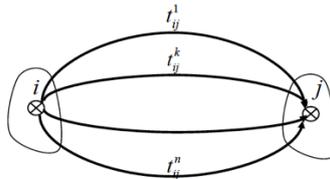


Figura 12: Visualización gráfica del modelo Logit. Fuente: Transportes, MUEI, UPC

El modelo Logit [2] tiene las siguientes variables y propiedades:

t_{ij}^k : viatges entre les zones i, j amb mode k

Figura 13: Variable del modelo Logit. Fuente: Transportes, MUEI, UPC

$$\sum_{k=1}^n t_{ij}^k = t_{ij} \quad n \text{ modes } k = 1..n$$

Figura 14: Ecuación del modelo Logit. Fuente: Transportes, MUEI, UPC

Donde i representa el origen, j el destino y k el modo de transporte. Como se conoce la demanda total de viajes, gracias a los datos de Orange, y se conoce la demanda de viajes en coche y en avión, se puede obtener la demanda de viajes en tren, dato desconocido inicialmente.

Esto es lo mismo que decir que la probabilidad (p) de escoger cada uno de los diferentes modos de transporte ha de ser igual a la unidad.

$$\sum_{k=1}^n p_{ij}^k = p_{ij}$$

Figura 15: Ecuación del modelo Logit. Fuente: propia

Se conocen los siguientes datos de la ruta Barcelona – Valencia, a partir del estudio de demanda realizado:

- Movilidad total → 2.479 personas/día.
- Movilidad en coche → 1.546 personas/día → representa un 62,36 % del total.
- Movilidad en avión → 110 personas/día → representa un 4,437 % del total.

Si se aplica el modelo Logit, se estima que un 33,203% de los viajes de Barcelona a Valencia se hacen en tren, o que la demanda en este modo de transporte es de 823 personas/día.

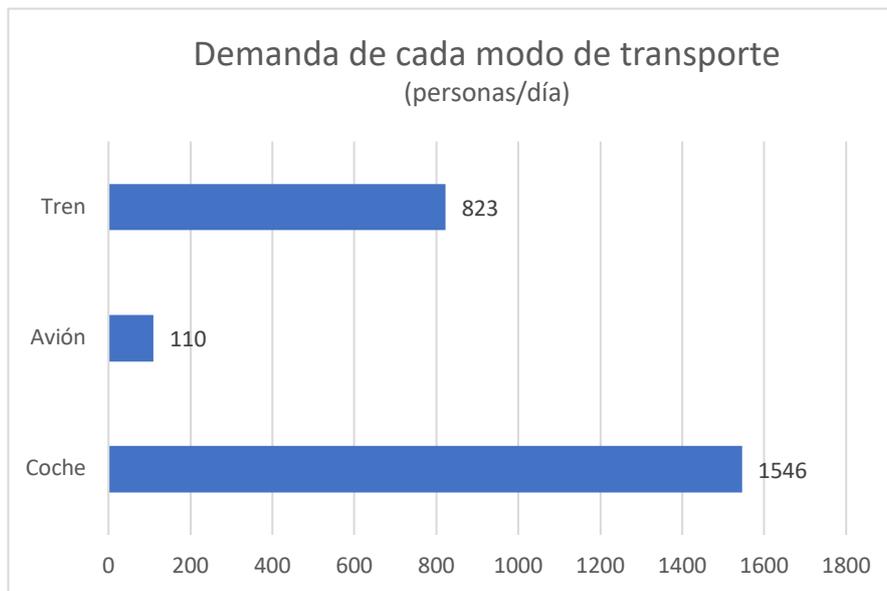


Gráfico 2: Demanda según el modo de transporte. Fuente: propia

5.5. Estimación de la demanda

El objetivo de este apartado es estimar la demanda que tendría el servicio de aerotaxis. Para ello, hace falta dividir el estudio en dos situaciones diferentes:

- Situación actual → existen tres modos de transporte para ir de Barcelona a Valencia: coche, tren, avión.
- Situación futura → existen cuatro modos de transporte para ir de Barcelona a Valencia: coche, tren, avión, aerotaxi.

El porcentaje actual de cada modo de transporte para ir de Barcelona a Valencia (se da por hecho que solo hay tres formas):

- El 62,4 % escoge el vehículo privado (1.546 personas/día).
- El 4,4 % escoge el avión (110 personas/día).
- El 33,2 % escoge el tren (823 personas/día).

Evaluar la demanda exacta de un servicio tan diferente a los que existen dará unos resultados aproximados, ya que depende de la adopción por parte del público y es un servicio que todavía no existe.

No obstante, se realizará la estimación siguiendo el modelo Logit multinomial [2], y calculando el nuevo repartimiento modal si se añade un modo de transporte nuevo k (el aerotaxi). Esto permitirá conocer qué % de clientes absorbe el aerotaxi para ir de Barcelona a Valencia. Hace falta recalcar, una vez más, que estos resultados son variables en función de la ruta que se esté estudiando.

Si se aplica el modelo Logit multinomial, la función para calcular el repartimiento modal es la siguiente:

$$p_k = \frac{e^{V_k}}{\sum_l e^{V_l}} \quad \forall k \in K$$

Ecuación 1: Función del repartimiento modal según el modelo Logit multinomial.

Fuente: Transportes, MUEI, UPC

Donde:

- p_k es la probabilidad de escoger el modo de transporte k .
- V_k (adimensional) es la parte observable de la función utilidad y se calcula de la siguiente forma:

$$V_k = \beta \cdot c_k + \gamma_k$$

Ecuación 2: Parte observable de la función utilidad.

Fuente: Transportes, MUEI, UPC

La utilidad es un concepto abstracto sin significado y sin unidades. Solo sirve para comparar. La función utilidad es la siguiente:

$$U_k = V_k + \varepsilon_k$$

Ecuación 3: Función utilidad.

Fuente: Transportes, MUEI, UPC

Solo se tiene en cuenta la parte observable, ya que la parte no observable (ε_k) es un valor aleatorio y no tiene sentido tenerlo en cuenta.

Donde:

- β es un coeficiente de conversión del coste a utilidad y que depende del territorio. Se expresa en €^{-1} .
- c_k es el coste generalizado del modo k , expresado en €. El coste generalizado se calcula diferente según el transporte es público o privado, pero incluye el coste económico y el coste del tiempo de viaje.

$$c_k = (e_k + \alpha \cdot t_k)$$

Ecuación 4: Cálculo del coste generalizado del modo de transporte

Fuente: Transportes, ETSEIB, UPC

Donde:

- e_k representa el coste económico, expresado en €.
- t_k representa el tiempo de desplazamiento (recorrido, acceso, espera, etc.)
- α representa el valor del tiempo, expresado en €/h. Se ha tomado el valor de referencia, estimado en 10€/h^{21} .
- γ_k es la comodidad del modo k , coeficiente adimensional.

²¹ Coste estipulado del tiempo (en el ámbito del transporte). Referencia: Apuntes de Transportes, ETSEIB, UPC.

5.5.1. Situación actual

Antes de poder aplicar la función del repartimiento modal para cada modo de transporte en la situación actual (3 modos: coche, avión y tren) hace falta calcular los costes generalizados de cada uno de ellos. Para poder calcular los costes generalizados, hace falta explicar previamente en qué consiste el tiempo de viaje según si el transporte es público o privado.

El tiempo del viaje si el **transporte es público** se descompone en:

- Tiempo de acceso al origen (t_a) → tiempo que se tarda en acceder a la estación desde donde se va a iniciar la ruta.
- Tiempo de acceso al destino (t_a) → tiempo que se tarda en acceder desde la estación destino hasta el lugar de destino.
- Tiempo de espera (t_w) → tiempo que se espera al transporte o franja de tiempo que se calcula de llegada hasta la hora de salida. En el caso de este proyecto, se interpreta el tiempo de espera como la franja de tiempo entre hora de llegada del pasajero y hora de salida del transporte, ya que son transportes en los cuales se compra el billete por adelantado.
- Tiempo de recorrido (t_{rec}) → duración del trayecto.
- Tiempo de enlace o correspondencia (t_c) → tiempo que se tarda en hacer transbordos o escalas. En este proyecto no se contempla, ya que no se consideran ni transbordos ni escalas en ninguno de los modos de la ruta.

Si el **transporte es privado**, el tiempo del viaje incluye:

- Tiempo de acceso al origen y destino (t_a) → dado que es muy pequeño, se considera menospreciable en el proyecto.
- Tiempo de recorrido (t_{rec}) → duración del trayecto.

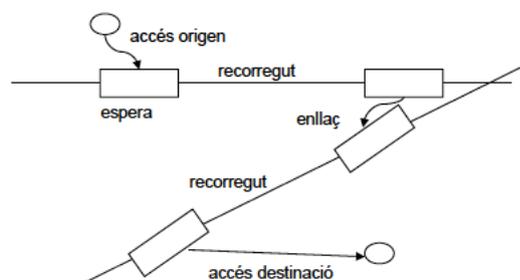


Figura 16: Representación gráfica del tiempo de viaje. Fuente: Transportes, ETSEIB, UPC

El **transporte público** tiene un coste asociado al tiempo de acceso, espera y recorrido (aplicando la conversión del valor del tiempo: 10€/h) y un coste económico asociado al billete.

El **transporte privado** tiene un coste asociado al tiempo de recorrido (aplicando la conversión del valor del tiempo: 10€/h) y un coste económico, asociado a los kilómetros del trayecto.

Ya se pueden calcular los costes generalizados para cada modo de transporte de la ruta Barcelona – Valencia.

5.5.1.1. Cálculo de tiempos y coste generalizado del coche

TRANSPORTE PRIVADO
Tiempo de viaje = tiempo de recorrido
Coste generalizado = coste tiempo de viaje + coste económico

Coste del tiempo del viaje

El coste del tiempo del viaje en un vehículo privado se calcula como el producto de la duración del recorrido (horas) y el coste del tiempo (10€/h).

Para calcular la duración del recorrido se hace un promedio de datos de duración real, los que se han utilizado anteriormente en el apartado donde se ha establecido el índice de congestión. La duración media obtenida es de 4,4h²².

El coste del tiempo del viaje en la ruta de Barcelona a Valencia es de 44€.

Coste económico

El coste económico del viaje se obtiene multiplicando el coste unitario (€/km) por el número de kilómetros entre origen y destino y dividiéndolo por el índice de ocupación medio en el vehículo, para tener un coste estimado por pasajero.

²² Datos disponibles en el Anexo 3.

Se considera un coste unitario medio de 0,28 €/km²³. Sabiendo que entre Barcelona y Valencia hay una distancia media de 350 km y que se consideran 1,1 ocupantes/vehículo²⁴, el coste económico es de 89 €.

De esta manera, el coste generalizado del coche es de 133€.

5.5.1.2. Cálculo de tiempos y coste generalizado del avión

TRANSPORTE PÚBLICO
Tiempo de viaje = tiempo de acceso origen y destino + tiempo de espera + tiempo de recorrido
Coste generalizado = coste tiempo de viaje + coste billete

Coste del tiempo del viaje

El tiempo del viaje en un transporte público engloba el tiempo de acceso a los aeropuertos (origen-aeropuerto origen y aeropuerto destino-destino), el tiempo de espera y el tiempo de recorrido.

Para establecer un tiempo de acceso aproximado, se calcula el tiempo medio desde:

- Centro de la ciudad origen – aeropuerto origen → aprox. 30 min²⁵.
- Aeropuerto destino – centro de la ciudad destino → aprox. 25 min²⁶.

Se aplica un margen de seguridad de 10 minutos (a cada trayecto), ya que puede haber retrasos o inconvenientes en las respectivas rutas.

Por tanto, el tiempo de acceso aproximado es de 1 hora y 15 minutos.

²³ Precio medio del kilometraje en 2019. Precio no regulado, cifra variable. Fuente: <https://aegfanews.com/gestion/1136-a-cuanto-se-paga-el-kilometraje-en-espana>

²⁴ Tal y como se ha justificado en el capítulo anterior, en el estudio de movilidad del coche (DGT).

²⁵ Se hace una media del tiempo de acceso en taxi y en transporte público. No se ha tenido en cuenta la alternativa del coche.

²⁶ Se hace una media del tiempo de acceso en taxi y en transporte público. No se ha tenido en cuenta la alternativa del coche.

El tiempo de espera depende de si se factura el equipaje o no.

- Se suele llegar 1h y 30 minutos antes si se factura el equipaje, aproximadamente.
- Se suele llegar 1h antes si no se factura el equipaje, aproximadamente.

Se aplica un margen de seguridad de 30 minutos, ya que se pueden retrasar los vuelos.

Por tanto, se estima un tiempo de espera medio de 1h y 45 minutos.

El tiempo de recorrido es el tiempo de vuelo, y es de 55 minutos²⁷.

De esta manera, el tiempo del viaje es de 4h. El coste del tiempo del viaje, por tanto, será el producto de las 4h resultantes por el coste del tiempo, de 10€/h = 40 €.

Coste del billete

Los precios de los billetes de avión son muy variables, ya que se rigen exclusivamente por la oferta y la demanda. Si la demanda es alta se disparan los precios, mientras que si es baja el precio cae. Por este motivo, es difícil fijar un precio de billete de avión. Para dar un valor orientativo, se ha mirado la página de Skyscanner²⁸ y se han buscado diferentes vuelos a lo largo del año.

Se han recogido datos de vuelos de diferentes precios, teniendo en cuenta el mes, el tipo de día, y en diferentes momentos del día, de todo un año.

Debido a que la demanda de la ruta Barcelona-Valencia en avión es baja, las compañías aéreas no ofrecen muchas opciones de vuelos. Se ha observado que muchos de los vuelos incluían al menos una o dos escalas. Esta opción se ha descartado a la hora de establecer el precio medio, ya que si se contemplan escalas en el estudio, el coste debería tener en cuenta el tiempo de enlace o correspondencia, el tiempo de espera asociado a la escala, etc. y se complica mucho más el estudio. Además, no tiene mucho sentido que una persona haga una escala cuando hay opciones directas para la ruta Barcelona – Valencia.

²⁷ Duración del vuelo sacada a partir de un billete.

²⁸ Skyscanner es un motor de búsqueda global que compara vuelos; entre otras cosas.

A partir de los datos disponibles, se puede estimar un coste del billete de 44,34 €²⁹.

No hay que olvidarse de incluir el coste del servicio³⁰ para ir/volver:

- Desde el centro de la ciudad origen hasta el aeropuerto origen → aprox. 17€.
- Desde el aeropuerto destino hasta el centro de la ciudad destino → aprox. 12€.

Así pues, el coste generalizado del avión es de 113€.

5.5.1.3. Cálculo de tiempos y coste generalizado del tren

TRANSPORTE PÚBLICO
Tiempo de viaje = tiempo de acceso origen y destino + tiempo de espera + tiempo de recorrido
Coste generalizado = coste tiempo de viaje + coste billete

Coste del tiempo del viaje

El tiempo del viaje es la suma del tiempo de acceso, el tiempo de espera y el tiempo de recorrido.

El tiempo de acceso se calcula como el tiempo medio desde:

- Centro de la ciudad origen – estación de tren origen → aprox. 11 min³¹.
- Estación de tren destino – dentro de la ciudad destino → aprox. 16 min³².

Se aplica un margen de seguridad de 5 minutos (a cada trayecto), ya que puede haber factores no previsibles que impliquen un retraso en estos tiempos.

El tiempo de acceso aproximado es de 36 minutos.

²⁹ Datos disponibles en el Anexo 9.

³⁰ Se hace una media, para cada trayecto, del precio para ir en taxi y en transporte público. No se ha contemplado la ruta en coche. Desglose de precios disponible en el Anexo 9.

³¹ Se hace una media del tiempo de acceso en taxi y en transporte público. No se ha tenido en cuenta la alternativa del coche.

³² Se hace una media del tiempo de acceso en taxi y en transporte público. No se ha tenido en cuenta la alternativa del coche.

El tiempo de espera se calcula teniendo en cuenta que la gente llega con una media de 15 minutos antes a que salga el tren (hay gente que llega antes, pero hay gente que llega los 2 minutos antes del cierre de puertas). No se aplica ningún margen de seguridad, ya que los trenes acostumbran a ser muy puntuales y a cumplir los horarios que estaban establecidos. Por tanto, el tiempo de espera estimado es de 15 minutos.

El tiempo de recorrido es la duración del tren desde origen a destino, y es de 2h y 40 minutos. Aquí a veces el tiempo se ve afectado, ya que al haber paradas a veces se sufre algún retraso. Por tanto, se le añade un tiempo adicional de 15 minutos, siendo el tiempo de recorrido estimado de 2h y 55 minutos.

De esta manera, el tiempo de viaje es de 3,8h. El coste del tiempo del viaje, multiplicando este valor por el coste del tiempo (10€/h) es de 38€.

Coste del billete

Los precios de billetes de tren también varían en función de la oferta y demanda. Se han recogido datos³³ de diferentes precios, obteniendo un precio medio por el billete de 30,20€.

Si se contabiliza el coste del servicio³⁴ para ir/volver:

- Desde el centro de la ciudad origen hasta la estación de tren origen → aprox. 5€.
- Desde la estación de tren destino hasta el centro de la ciudad destino → aprox. 4€.

Se obtiene un coste generalizado para el tren de 77€.

³³ Datos disponibles en Anexo 8.

³⁴ Se hace una media, para cada trayecto, del precio para ir en taxi y en transporte público. No se contempla la ruta en coche. Desglose de precios disponible en el Anexo 9.

A continuación, se presenta una tabla resumen que recoge los datos disponibles hasta ahora, según cada modo de transporte:

Modo de transporte	Probabilidad del modo, p_k	t_a (h)	t_w (h)	t_{rec} (h)	Coste generalizado, c_k (€)
Coche	0,624	-	-	4,4	133 €
Tren	0,332	0,6	0,25	2,92	77 €
Avión	0,044	1,25	1,75	0,92	113 €

Tabla 8: Probabilidades y costes de cada modo de transporte. Fuente: propia

5.5.2. Modelo Logit

Ya se conocen los datos de probabilidad, tiempos y coste generalizado para cada modo de transporte, pero aun no se pueden aplicar las ecuaciones:

$$p_k = \frac{e^{V_k}}{\sum_l e^{V_l}} \quad \forall k \in K \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$V_k = \beta \cdot c_k + \gamma_k \quad (\text{Ecuación 2})$$

Todavía falta determinar el factor comodidad, ya que sino sería lógico pensar que el modo de transporte que tiene más probabilidad es el que tenga el coste generalizado más bajo. Sin embargo, ya se puede comprobar que esto no es así. Hay más factores que intervienen en la utilidad del modo, y ahí entra la comodidad de este.

En este caso, no tiene sentido que la comodidad sea un factor estimado, ya que no se puede escoger un factor arbitrario, pues es muy subjetivo y no sería una aproximación real. Por tanto, se ha decidido expresar la comodidad como una función lineal que depende de tres parámetros: el tiempo de acceso (t_a), el tiempo de espera (t_w) y el tiempo de desplazamiento o recorrido (t_{rec}). Establecer esta función comodidad tiene sentido, aunque la comodidad es siempre algo subjetivo, todo el mundo coincide con que a menos tiempo tanto de acceso como de espera y recorrido; más cómodo es el modo de transporte.

De esta manera, la función comodidad generalizada para el modo de transporte es:

$$\gamma_k = \gamma_1 \cdot t_{a_k} + \gamma_2 \cdot t_{w_k} + \gamma_3 \cdot t_{rec_k}$$

Ecuación 5: Función comodidad

Si se aplican las ecuaciones 1, 2 y 5 a la vez, queda el siguiente sistema a resolver:

$$p_k = \frac{e^{(\beta \cdot c_k + \gamma_1 \cdot t_{a_k} + \gamma_2 \cdot t_{w_k} + \gamma_3 \cdot t_{rec_k})}}{\sum_l e^{(\beta \cdot c_l + \gamma_1 \cdot t_{a_l} + \gamma_2 \cdot t_{w_l} + \gamma_3 \cdot t_{rec_l})}} \quad \forall k \in K$$

Ecuación 6: Modelo Logit adaptado al proyecto

Para la situación actual, en la que existen 3 modos de transporte diferentes, se conocen las probabilidades, los costes y los tiempos respectivos de cada uno de ellos. No obstante, no se conoce ni el factor de conversión de coste a utilidad (β) ni los factores $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ de la función comodidad.

Si se plantea un sistema de ecuaciones, se tienen 3 ecuaciones (3 modos de transporte) y 4 incógnitas ($\beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$). Por tanto, este sistema no se puede resolver.

Como se ha dicho anteriormente, el coeficiente β depende del territorio. De esta manera, no tiene sentido que a partir de únicamente una ruta se determinen coeficientes que luego tienen que ser aplicables para la estimación de la demanda de otros trayectos. Con el fin de que el modelo sea representativo, se necesitan más datos de costes, tiempos y probabilidades para determinar un valor aceptable de los coeficientes anteriores. Por tanto, se han escogido las siguientes rutas del proyecto que tienen como origen la ciudad de Barcelona:

- Barcelona – Castellón → se contemplan dos modos de transporte: coche y tren.
- Barcelona – Girona → se contemplan dos modos de transporte: coche y tren.
- Barcelona – Tarragona → se contemplan dos modos de transporte: coche y tren.
- Barcelona – Palma de Mallorca → se contemplan dos modos de transporte: avión y barco.
- Barcelona – Ibiza → se contemplan dos modos de transporte: avión y barco.

Para calcular los costes generalizados de cada modo para cada ruta, se ha seguido el mismo razonamiento y proceso exacto que para el cálculo de estos en la ruta Barcelona – Valencia:

1. A partir de datos de movilidad del operador móvil (datos totales de movilidad) se conoce la demanda media real.
 - a. Para las rutas que tienen las alternativas coche y tren:
 - A partir de la DGT se estima una Intensidad Media Diaria de vehículos, traducido a personas con la conversión de 1,1 ocupantes/vehículo. Para obtener una duración media de cada trayecto se han utilizado los datos de congestión extraídos de la API de Google Maps.
 - Al no conocer datos de movilidad de RENFE por confidencialidad de datos, se aplica el modelo Logit (sumatorio de probabilidades = 1) para determinar la probabilidad de este modo de transporte.
 - b. Para las rutas que tienen las alternativas de avión y barco:
 - A partir de los *datasets* de AENA, conocemos la demanda de pasajeros/día que escogen el avión para cada una de las rutas.
 - Al no conocer datos de movilidad de Balearia por confidencialidad de datos, se aplica el modelo Logit (sumatorio de probabilidades = 1) para determinar la probabilidad de este modo de transporte.
2. Se determina la probabilidad de cada modo (p_k : probabilidad actual real y p_k' : probabilidad real estimada con Logit).
3. Se determinan los costes generalizados, siguiendo la misma hoja de ruta que la explicada en el trayecto Barcelona – Valencia; teniendo en cuenta los costes y tiempos según si el transporte es público o privado.

A continuación, se presenta la tabla que recoge los datos de probabilidades, tiempos y costes generalizados para cada modo de transporte y para cada una de las rutas³⁵:

³⁵ El desglose de todos los cálculos (de cada ruta y de cada modo) está disponible en el Anexo 9 y 11.

Ruta	Modo de transporte	Probabilidad del modo, p_k	t_a (h)	t_w (h)	t_{rec} (h)	Coste generalizado, c_k (€)
Barcelona – Castellón	Coche	0,624	-	-	4,4	133
	Tren	0,332	0,6	0,25	2,92	77
Barcelona – Girona	Coche	0,509	-	-	1,53	41,53
	Tren	0,491	0,43	0,25	0,72	57
Barcelona – Tarragona	Coche	0,587	-	-	1,53	40,23
	Tren	0,413	0,48	0,25	0,65	44
Barcelona – Mallorca	Avión	0,650	1,37	1,75	0,92	140
	Barco	0,350	0,72	1,08	6,67	137
Barcelona – Ibiza	Avión	0,729	1,2	1,75	1	186
	Barco	0,271	0,75	1,08	9,17	180

Tabla 9: Probabilidades y costes de cada modo para cada ruta. Fuente: propia

Esto añade, como se puede observar, 10 ecuaciones más al sistema que se tenía inicialmente, (3 ecuaciones). Así pues, el sistema a resolver es el siguiente:

$$0,624 = \frac{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}}$$

Ecuación 7: Logit, Barcelona - Valencia, coche

$$0,332 = \frac{e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}}$$

Ecuación 8: Logit, Barcelona – Valencia, tren

$$0,044 = \frac{e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}}$$

Ecuación 9: Logit, Barcelona – Valencia, avión

$$0,774 = \frac{e^{(\beta \cdot 107,86 + \gamma_3 \cdot 3,63)}}{e^{(\beta \cdot 107,86 + \gamma_3 \cdot 3,63)} + e^{(\beta \cdot 70 + \gamma_1 \cdot 0,42 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,08)}}$$

Ecuación 10: Logit, Barcelona – Castellón, coche

$$0,226 = \frac{e^{(\beta \cdot 70 + \gamma_1 \cdot 0,42 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,08)}}{e^{(\beta \cdot 107,86 + \gamma_3 \cdot 3,63)} + e^{(\beta \cdot 70 + \gamma_1 \cdot 0,42 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,08)}}$$

Ecuación 11: Logit, Barcelona – Castellón, tren

$$0,509 = \frac{e^{(\beta \cdot 41,53 + \gamma_3 \cdot 1,53)}}{e^{(\beta \cdot 41,53 + \gamma_3 \cdot 1,53)} + e^{(\beta \cdot 57 + \gamma_1 \cdot 0,43 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 0,72)}}$$

Ecuación 12: Logit, Barcelona – Girona, coche

$$0,491 = \frac{e^{(\beta \cdot 57 + \gamma_1 \cdot 0,43 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 0,72)}}{e^{(\beta \cdot 41,53 + \gamma_3 \cdot 1,53)} + e^{(\beta \cdot 57 + \gamma_1 \cdot 0,43 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 0,72)}}$$

Ecuación 13: Logit, Barcelona – Girona, tren

$$0,587 = \frac{e^{(\beta \cdot 40,23 + \gamma_3 \cdot 1,53)}}{e^{(\beta \cdot 40,23 + \gamma_3 \cdot 1,53)} + e^{(\beta \cdot 44 + \gamma_1 \cdot 0,48 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 0,65)}}$$

Ecuación 14: Logit, Barcelona – Tarragona, coche

$$0,413 = \frac{e^{(\beta \cdot 44 + \gamma_1 \cdot 0,48 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 0,65)}}{e^{(\beta \cdot 40,23 + \gamma_3 \cdot 1,53)} + e^{(\beta \cdot 44 + \gamma_1 \cdot 0,48 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 0,65)}}$$

Ecuación 15: Logit, Barcelona – Tarragona, tren

$$0,650 = \frac{e^{(\beta \cdot 140 + \gamma_1 \cdot 1,37 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}}{e^{(\beta \cdot 140 + \gamma_1 \cdot 1,37 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)} + e^{(\beta \cdot 137 + \gamma_1 \cdot 0,72 + \gamma_2 \cdot 1,08 + \gamma_3 \cdot 6,67)}}$$

Ecuación 16: Logit, Barcelona – Palma de Mallorca, avión

$$0,350 = \frac{e^{(\beta \cdot 137 + \gamma_1 \cdot 0,72 + \gamma_2 \cdot 1,08 + \gamma_3 \cdot 6,67)}}{e^{(\beta \cdot 140 + \gamma_1 \cdot 1,37 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)} + e^{(\beta \cdot 137 + \gamma_1 \cdot 0,72 + \gamma_2 \cdot 1,08 + \gamma_3 \cdot 6,67)}}$$

Ecuación 17: Logit, Barcelona – Palma de Mallorca, barco

$$0,729 = \frac{e^{(\beta \cdot 186 + \gamma_1 \cdot 1,2 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 1)}}{e^{(\beta \cdot 186 + \gamma_1 \cdot 1,2 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 1)} + e^{(\beta \cdot 180 + \gamma_1 \cdot 0,75 + \gamma_2 \cdot 1,08 + \gamma_3 \cdot 9,17)}}$$

Ecuación 18: Logit, Barcelona – Ibiza, avión

$$0,271 = \frac{e^{(\beta \cdot 180 + \gamma_1 \cdot 0,75 + \gamma_2 \cdot 1,08 + \gamma_3 \cdot 9,17)}}{e^{(\beta \cdot 186 + \gamma_1 \cdot 1,2 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 1)} + e^{(\beta \cdot 180 + \gamma_1 \cdot 0,75 + \gamma_2 \cdot 1,08 + \gamma_3 \cdot 9,17)}}$$

Ecuación 19: Logit, Barcelona – Ibiza, barco

Dado que tenemos un sistema de 13 ecuaciones y 4 incógnitas, no se puede resolver. Se tiene que plantear un modelo de optimización para encontrar la solución óptima de cada uno de los cuatro coeficientes.

Un modelo de optimización siempre tiene una función objetivo y puede estar sujeto a diferentes restricciones. La función objetivo, en este caso, consiste en minimizar la diferencia cuadrática de cada una de las probabilidades actuales reales (conocidas a partir de los datos de movilidad totales y de cada modo para cada ruta) y de las probabilidades actuales calculadas (a partir del modelo Logit adaptado de cada modo y para cada ruta). A raíz de este planteamiento, se obtendrán los valores de los parámetros que verifican esta minimización, y al quedar fijados, serán aplicables para la estimación de la demanda de cualquier otra ruta.

La función objetivo es la siguiente:

$$f(\beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = \text{MIN} \left(\sum_{i=0}^n (p_k' - p_k)^2 \right)$$

Ecuación 20: Función objetivo

Donde:

- n es el número total de trayectos (todos los modos de todas las rutas).
- k es el modo de transporte.
- $\beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ son los coeficientes anteriormente explicados.
- p_k' es la probabilidad actual calculada de cada modo para cada ruta, aplicando las

ecuaciones del modelo Logit recientemente escritas.

- p_k es la probabilidad actual real de cada modo y ruta, conocida a partir de los datos de movilidad totales reales.

Para solucionar este sistema de optimización no se han añadido restricciones, ya que no hay.

Para encontrar la solución óptima se ha utilizado el Solver, complemento de Microsoft Excel. Este método se lleva a cabo para un análisis y si, y te encuentra un valor óptimo para una fórmula en una celda (función objetivo), que está sujeta a restricciones o limitaciones en los valores de otras celdas de fórmula en la hoja de cálculo (en este caso, los valores de los parámetros no presentan limitaciones). Solver trabaja con las celdas de variables de decisión o, simplemente, celdas de variables que se usan para calcular fórmulas en las celdas objetivo y de restricción. De esta manera, Solver es capaz de ajustar los valores de las celdas de variables de decisión para que cumplan con los límites de las celdas de restricción (en caso de haberlas) y den el resultado deseado en la celda objetivo.

Dado que las ecuaciones del modelo Logit no son lineales, el método de resolución empleado en el sistema es el GRG Nonlinear.

Una vez planteado el sistema³⁶, Solver converge a una solución, que fija los siguientes valores para los coeficientes:

$$\beta = 0,017 \text{ €}^{-1}$$

$$\gamma_1 = -0,29 \text{ h}^{-1}$$

$$\gamma_2 = -1,46 \text{ h}^{-1}$$

$$\gamma_3 = -0,27 \text{ h}^{-1}$$

Una vez obtenidos los valores de los coeficientes, se pueden estimar las probabilidades calculadas, aplicando el modelo Logit. Estas se presentan a continuación:

³⁶ Hoja de cálculo disponible en el Anexo 11.

Ruta	Modo	p_k (probabilidad real)	p_k' (probabilidad calculada)
BCN - VLC	Coche	0,624	0,696
BCN - VLC	Tren	0,332	0,237
BCN - VLC	Avión	0,044	0,067
BCN - CAST	Coche	0,774	0,67
BCN - CAST	Tren	0,226	0,33
BCN - GIR	Coche	0,509	0,505
BCN - GIR	Tren	0,491	0,495
BCN - TGN	Coche	0,587	0,552
BCN - TGN	Tren	0,413	0,448
BCN - PMI	Avión	0,65	0,6
BCN - PMI	Barco	0,35	0,4
BCN - IBZ	Avión	0,729	0,761
BCN - IBZ	Barco	0,271	0,239

Tabla 10: Probabilidades reales y calculadas de cada modo y ruta. Fuente: propia

5.5.3. Análisis del modelo

Antes de utilizar el modelo para estimar la demanda futura en el servicio de aerotaxis, se debe realizar un análisis para comprobar si este modelo es válido.

Para comprobar su validez, se utiliza el ajuste por el método de los mínimos cuadrados a una recta ($y = a \cdot x + b$). Se comparan los resultados de las probabilidades calculadas y reales, con el fin de asegurar que la dispersión que causan los errores experimentales sea la mínima posible.

El método de los mínimos cuadrados calcula a partir de los N pares de datos (p_k, p_k') los valores de la pendiente (a) y del punto de corte con el eje (b) que mejor ajustan los datos a una recta. Se entiende por mejor ajuste aquella recta que hace mínimas las distancias (d_1, d_2, \dots, d_N) de los puntos medidos a la recta.

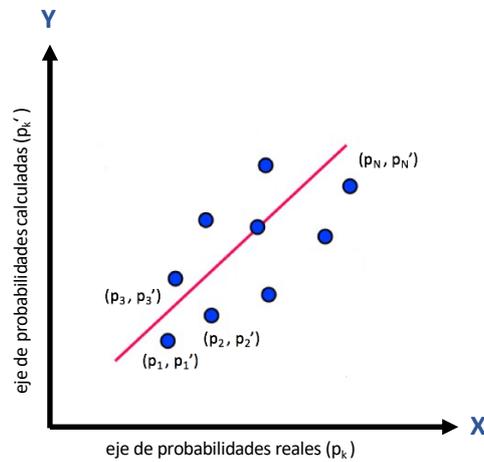


Figura 17: Método de los mínimos cuadrados. Fuente: propia

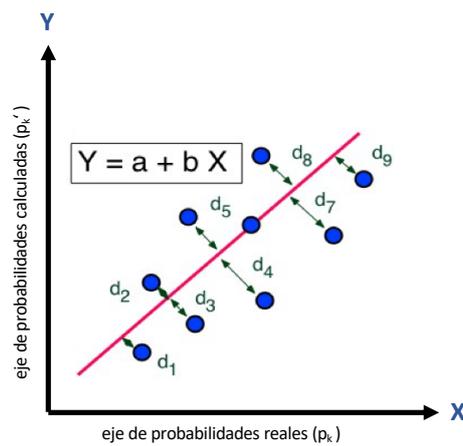


Figura 18: Recta de ajuste por mínimos cuadrados (distancias mínimas). Fuente: propia

A partir de los datos de probabilidades presentados en la *Tabla 10*, se pueden representar cada uno de los pares de puntos y obtener así la recta de ajuste:

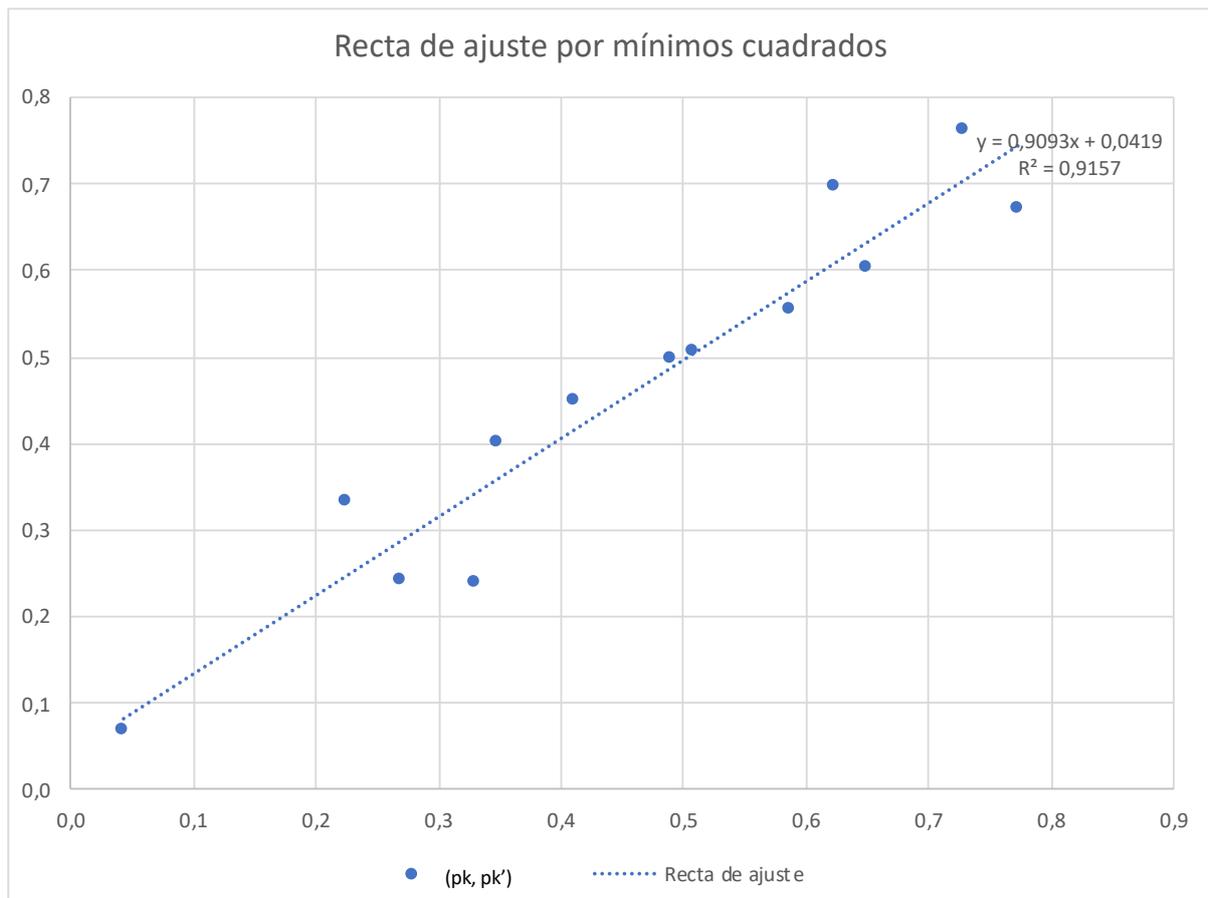


Gráfico 3: Representación gráfica de la recta de ajuste. Fuente: propia

Después de ajustar un modelo lineal se debe determinar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos reales. Para reflejar la bondad del ajuste, existe el parámetro estadístico R^2 . El coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Por tanto, indica qué tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada.

Los valores de R^2 siempre están entre el 0 y el 1:

- 0 indica que el modelo no explica ninguna porción de la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.
- 1 indica que el modelo explica toda la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

En general, cuanto mayor coeficiente de determinación, mejor se ajusta el modelo a los datos. Por tanto, si el valor de R^2 :

- $R^2 < 0,7 \rightarrow$ modelo no válido y hará falta revisar de nuevo las variables que intervienen en las ecuaciones.

- $0,7 < R^2 < 0,9 \rightarrow$ modelo válido, pero el ajuste no es del todo bueno.
- $R^2 > 0,9 \rightarrow$ modelo válido, buen ajuste que se corresponde con la realidad.

No obstante, el coeficiente de determinación no puede determinar si las estimaciones y predicciones de los coeficientes están sesgadas, y por eso deberían examinarse las gráficas de residuos. Esto quiere decir que el R^2 no indica si un modelo de regresión es adecuado y que puede tener un valor bajo para un modelo adecuado y un valor alto para un modelo que no se ajusta a los datos. En este caso se puede observar que, a parte del R^2 alto, el modelo se ajusta muy bien a los datos, y por tanto los valores de los coeficientes son válidos para estimar la demanda.

5.5.4. Situación futura

Una vez determinados los coeficientes $(\beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ en la situación actual del cálculo de la demanda en la ruta Barcelona – Valencia, se puede estimar qué demanda tendría la nueva forma de movilidad: los aerotaxis.

Recordemos el sistema de ecuaciones en la situación actual, para la ruta Barcelona – Valencia. Al haber tres modos distintos de transporte, existían tres ecuaciones en el sistema:

$$p_{coche} = \frac{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}} = 0,624$$

Ecuación 21: Logit, Barcelona - Valencia, coche

$$p_{tren} = \frac{e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}} = 0,332$$

Ecuación 22: Logit, Barcelona – Valencia, tren

$$p_{avión} = \frac{e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}} = 0,044$$

Ecuación 23: Logit, Barcelona – Valencia, avión

Recordemos el valor encontrado para los coeficientes, a partir de datos de la situación actual y aplicable en la situación futura:

$$\beta = 0,017 \text{ €}^{-1}$$

$$\gamma_1 = -0,29 \text{ h}^{-1}$$

$$\gamma_2 = -1,46 \text{ h}^{-1}$$

$$\gamma_3 = -0,27 \text{ h}^{-1}$$

El sistema de ecuaciones del modelo Logit en la situación futura, al haber cuatro modos distintos de transporte, está formado por las siguientes cuatro ecuaciones:

$$p_{\text{coche}} = \frac{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)} + e^{(\beta \cdot c_{AT} + \gamma_1 \cdot t_{a_{AT}} + \gamma_2 \cdot t_{w_{AT}} + \gamma_3 \cdot t_{rec_{AT}})}}$$

Ecuación 24: Logit, Barcelona - Valencia, coche. Situación futura

$$p_{\text{tren}} = \frac{e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)} + e^{(\beta \cdot c_{AT} + \gamma_1 \cdot t_{a_{AT}} + \gamma_2 \cdot t_{w_{AT}} + \gamma_3 \cdot t_{rec_{AT}})}}$$

Ecuación 25: Logit, Barcelona – Valencia, tren. Situación futura

$$p_{\text{avión}} = \frac{e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)} + e^{(\beta \cdot c_{AT} + \gamma_1 \cdot t_{a_{AT}} + \gamma_2 \cdot t_{w_{AT}} + \gamma_3 \cdot t_{rec_{AT}})}}$$

Ecuación 26: Logit, Barcelona – Valencia, avión. Situación futura

$$p_{\text{aerotaxi}} = \frac{e^{(\beta \cdot c_{AT} + \gamma_1 \cdot t_{a_{AT}} + \gamma_2 \cdot t_{w_{AT}} + \gamma_3 \cdot t_{rec_{AT}})}}{e^{(\beta \cdot 133 + \gamma_3 \cdot 4,4)} + e^{(\beta \cdot 77 + \gamma_1 \cdot 0,6 + \gamma_2 \cdot 0,25 + \gamma_3 \cdot 2,92)} + e^{(\beta \cdot 113 + \gamma_1 \cdot 1,25 + \gamma_2 \cdot 1,75 + \gamma_3 \cdot 0,92)} + e^{(\beta \cdot c_{AT} + \gamma_1 \cdot t_{a_{AT}} + \gamma_2 \cdot t_{w_{AT}} + \gamma_3 \cdot t_{rec_{AT}})}}$$

Ecuación 27: Logit, Barcelona – Valencia, aerotaxi. Situación futura

Donde:

- c_{AT} → coste generalizado del aerotaxi
- $t_{a_{AT}}$ → tiempo de acceso del aerotaxi
- $t_{w_{AT}}$ → tiempo de espera del aerotaxi
- $t_{rec_{AT}}$ → tiempo de recorrido del aerotaxi

De la misma manera que para todos los modos de transporte, se deben determinar estos datos para el aerotaxi. Como es un transporte público, el tiempo de viaje y el coste generalizado se calculan de la siguiente forma:

TRANSPORTE PÚBLICO

Tiempo de viaje = tiempo de acceso origen y destino + tiempo de espera + tiempo de recorrido

Coste generalizado = coste tiempo de viaje + coste billete

Dado que los vertipuertos son infraestructuras que hoy en día no existen ni en Barcelona ni en Valencia, se han calculado los tiempos de acceso al origen y destino correspondientes bajo las siguientes hipótesis:

- Se considera que el vertipuerto de Barcelona es el Helipuerto del Puerto de Barcelona.
- Se considera que el vertipuerto de Valencia está ubicado en el Puerto de la Marina.

El tiempo de acceso a origen se calcula como la media de los tiempos en ir del centro de Barcelona al “vertipuerto de Barcelona” en taxi o transporte público. El tiempo medio es de 28 minutos, añadiendo un margen de 8 minutos por si hubiera tráfico en el trayecto por la vía urbana.

El tiempo de acceso a destino se calcula como la media de los tiempos en ir del “vertipuerto de Valencia” al centro de Valencia en taxi o en transporte público. El tiempo medio es de 25 minutos, añadiendo un margen de 8 minutos por si hubiera tráfico en el trayecto por la vía urbana.

Por tanto, el tiempo de acceso total estimado es de 69 minutos.

Como se ha dicho al principio del apartado, una de las ventajas del aerotaxi es que los usuarios puedan presentarse únicamente un cuarto de hora antes de la salida. Teniendo en cuenta que hay gente que prefiere no apurar y que tal vez llegue 25 minutos antes, el tiempo de espera medio se ha establecido en 20 minutos.

El tiempo de recorrido se ha calculado teniendo en cuenta que la velocidad del Lilium Jet es de 300 km/h y que entre Barcelona y Valencia hay 303 km aéreos, por tanto, este tiempo de recorrido es de 60,6 minutos.

El tiempo total del viaje es de 149 minutos. Teniendo en cuenta que el coste del tiempo es 10€/h, el coste del tiempo del viaje es de unos 24,85€.

Respecto al coste del billete, se tiene en cuenta el coste del servicio a medio plazo³⁷, ya que a corto plazo el servicio será muy caro. El coste del servicio a medio plazo se prevé de 0,33 €/km·pasajero³⁸ y como hay 303 km aéreos entre Barcelona y Valencia, se estima en 98€.

Si añadimos un coste medio del billete en el ámbito del acceso a los vertipuertos (precio medio entre taxi y transporte público), el coste total del billete asciende a unos 112,44€.

Por tanto, el coste generalizado del aerotaxi es de 137€.

A continuación, se presenta la tabla que recoge los datos de la situación futura:

Modo de transporte	t_a (h)	t_w (h)	t_{rec} (h)	Coste generalizado, c_k (€)
Coche	-	-	4,4	133 €
Tren	0,6	0,25	2,92	77 €
Avión	1,25	1,75	0,92	113 €
Aerotaxi	1,14	0,33	1,01	137 €

Tabla 11: Datos de la situación futura. Fuente: propia

Si se resuelven las ecuaciones del sistema (*Ecuaciones 24,25,26 y 27*) se obtienen las probabilidades futuras de cada modo de transporte:

³⁷ Se ha considerado el coste a medio plazo. Al final de este apartado se detalla el por qué.

³⁸ Obtención del coste del transporte en el apartado 6.9 del proyecto. Desglose de cálculos disponible en el Anexo 10.

Modo de transporte	p_k (probabilidad actual real)	p_k' (probabilidad actual calculada)	p_k'' (probabilidad futura)
Coche	0,624	0,696	0,385
Tren	0,332	0,237	0,131
Avión	0,044	0,067	0,037
Aerotaxi	N. A	N. A	0,446

Tabla 12: Probabilidades en la situación actual y real. Fuente: propia

Para la situación futura, y partiendo de la base de que la demanda de movilidad total en la ruta Barcelona – Valencia es de 2.479 personas/día, se prevé que:

- 955 personas/día escogerán el coche.
- 325 personas/día escogerán el tren.
- 92 personas/día escogerán el avión.
- 1.107 personas/día escogerán el aerotaxi.

El porcentaje de demanda que representa la nueva forma de movilidad es muy elevado. Esto da una idea de la gran acogida (a medio plazo) que puede tener implementar este servicio para esta ruta. Concretamente, absorbe el 53,5% de la demanda del coche, el 45% de la demanda del tren y el 1,5% de la demanda del avión.

Estos resultados no son sorprendentes, ya que el eVTOL tiene un coste económico a medio plazo muy parecido al precio del coche y un coste del tiempo (acceso + espera + recorrido) aproximado de 249€; mucho menos elevado que el de los otros modos de transporte. El hecho de optimizar el tiempo de viaje es algo muy atractivo, y que por eso genera tanta demanda.

No obstante, hace falta tener en cuenta y comentar una limitación que tiene el modelo que ofrece este proyecto. El modelo Logit se aprendió en la asignatura de Transportes y permite determinar el repartimiento modal de cada modo de transporte atendiendo a la utilidad desde el punto de vista de las personas (a más coste – menos utilidad, a más tiempo – menos comodidad). Por tanto, este tiene un sentido físico. No obstante, ha acabado perdiendo este sentido y convirtiéndose en un modelo puramente matemático. Esto es algo que sucede en la minería de los datos y ahora explicaremos el por qué.

La minería de los datos es un campo de la estadística y ciencias de computación referido al proceso que intenta descubrir patrones en grandes volúmenes de conjuntos de datos. El objetivo general de esta exploración de datos consiste en extraer información de un conjunto y transformarla en una estructura comprensible para su uso posterior. Estos patrones pueden ser vistos como un resumen de los datos de entrada y pueden ser utilizados en el análisis predictivo.

La explicación a esta limitación reside en la modelización de la utilidad y comodidad. Estas dos se han modelizado como funciones lineales ($\beta \cdot c_k + \gamma_1 \cdot t_a + \gamma_2 \cdot t_w + \gamma_3 \cdot t_{rec}$), haciendo que el modelo sea capaz únicamente de predecir la demanda para datos que se encuentren en el mismo rango de los datos de la situación actual.

Por esta razón, este modelo sirve exclusivamente para estimar la demanda que tendrá el servicio del aerotaxi a medio plazo, porque el coste del vehículo a medio plazo tiene un valor que está en el rango del precio del coche, avión y tren en la situación actual. No obstante, los precios a corto y largo plazo del aerotaxi son de un valor que se aleja al rango del que se está hablando. Se puede comprobar como, sustituyendo los valores de coste a corto y largo plazo el modelo calcula las probabilidades respectivas, obteniendo valores que no tienen ningún sentido. Respecto a los valores del tiempo de acceso, espera y recorrido son valores que se encuentran en el mismo rango para los cuatro modos de transporte, con sus diferencias respectivas cada uno; por tanto, esto no genera problemas.

El modelo se ha validado con el ajuste realizado por el método de los mínimos cuadrados. Este ajuste es muy bueno, cosa que se puede demostrar a partir de los datos de la situación actual. El modelo permite obtener resultados de probabilidad actual estimada que se asemejan fuertemente a los datos actuales de probabilidad real. Por eso se dice que inicialmente se le daba un sentido físico pero que se ha convertido, de alguna manera, en un modelo puramente matemático; y que es válido porque permite obtener resultados muy fiables si los valores del precio están en el rango de los demás modos de transporte.

Algunas de las causas por las cuales existe esta limitación es la poca cantidad de datos de los que se dispone y, aparte, estos datos de tiempos y costes son datos estimados; sumado a que las infraestructuras destinadas al aterrizaje y despegue de los aerotaxis no existen y se han escogido helipuertos de la zona para realizar los cálculos.

Seguramente, de cara al futuro y cuando esta forma de movilidad esté implementada, se podrán recopilar más datos. Esto permitirá adaptar el modelo para poder estimar la demanda a corto y largo plazo. También se podría pensar en definir la utilidad y comodidad como funciones no lineales y, de esta manera, aportar al modelo matemático ese sentido físico que en este caso ha perdido.

De cara a futuros proyectos también se podría pensar realizar el estudio de demanda según el tipo de usuario, estudio de más rutas, etc.

A modo de conclusión, se puede observar que la comodidad del aerotaxi es la más elevada de entre los cuatro modos, no solo por sus reducidos tiempos de espera y recorrido, sino que también por su razonable coste a medio plazo; que es prácticamente igual al coste del coche. Esto es algo objetivo que claramente hace que la previsión de demanda sea tan elevada, y que no entiende de la limitación del modelo planteado.

5.6. Variación de la demanda

Para evaluar la variación de la demanda a nivel de días y horas, se realiza la hipótesis de que los diferentes usos del servicio de aerotaxis corresponden a dos tipos de actividad: laboral y social. Se ha consultado un Estudio de Empleo del Tiempo³⁹, realizado en 2010, para conocer cuáles son los picos de demanda en estas dos actividades, los cuales hay que poder satisfacer. El estudio indica el porcentaje dedicado a hacer estas actividades según la hora del día.

Tratando los resultados del estudio y complementándolos con un análisis de la demanda horaria actual de los vuelos, se han podido extrapolar los resultados que aparecen a continuación:

³⁹ Disponible en el Anexo 12.

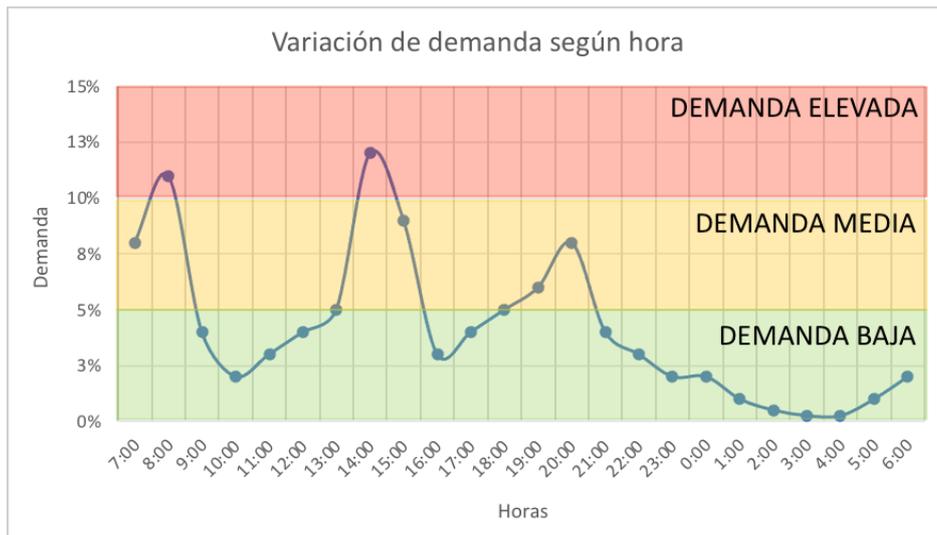


Gráfico 4: Variación de la demanda del servicio de aerotaxi. Fuente: propia⁴⁰

Como se puede observar en el gráfico, las franjas más congestionadas son: 7:00-9:00h, 14:00-15:00h, 19:00-21:00h. Esto corresponde a las variaciones de demanda de personas en los transportes, ya que la zona de la demanda alta coincide con el horario de inicio y fin de actividad laboral y los valores medios con el ocio. El servicio de aerotaxi tendrá que ser capaz absorber la demanda en estos picos.

Además, como se ha visto en el estudio de congestión, las horas de demanda elevada coinciden con las de más congestión en la vía urbana. Como el servicio de aerotaxi absorbe aproximadamente el 50% de la demanda del coche, se observa que mejorará notablemente el tráfico en las autopistas.

Respecto a evaluar la variación de demanda a nivel de meses, y como se ha observado en apartados anteriores, la demanda anual de la ruta Barcelona – Valencia es muy homogénea a lo largo del año . Por eso, se puede decir que variación de demanda anual del aerotaxi se mantendrá también estable durante todo el año.

⁴⁰ La idea de diseño del gráfico se ha encontrado en internet.

6. Modelo operativo

En general, existen diferentes aspectos importantes para tener en cuenta para garantizar la buena calidad del servicio de aerotaxis no solo en tiempo de vuelo, sino que también antes y después como, por ejemplo: optimización del tiempo, seguridad, medioambiente y bienestar general; entre otros.

- Optimización del tiempo:

No solo hace referencia a la velocidad del aerotaxi, sino que para realmente acortar el tiempo total de viaje es necesario garantizar al cliente que las operaciones en la estación tanto de origen como destino serán rápidas, incluso en los picos de alta demanda. Para eso, habrá personal destinado a que todas estas operaciones transcurran lo más ágiles posibles.

- Seguridad:

No solo hace referencia a la seguridad del propio aerotaxi, sino que también a la seguridad en las estaciones de salida y de llegada. Para ello, también habrá personal destinado a garantizar el buen cumplimiento de todas las normas de seguridad, control de acceso a las pistas, etc.

- Medioambiente:

No solo hace referencia al cuidado del medioambiente en el transcurso del vuelo, que reduce las emisiones de efecto invernadero, sino que las estaciones de aerotaxis deberán tener un impacto reducido sobre el medioambiente.

- Bienestar general:

Engloba todos los aspectos explicados recientemente, ya que los usuarios buscan no solo un transporte rápido en cuanto a vuelo y operaciones, sino que también una experiencia de viaje. Por tanto, las zonas previas y posteriores al vuelo deben estar bien acondicionadas para los pasajeros: incluir zonas de espera, servicios, tiendas de alimentación, etc.

El objetivo de este punto es hablar de algunos aspectos importantes relacionados con la operativa del servicio del aerotaxi, en este caso para la ruta Barcelona – Valencia. Mediante la elaboración del plan de operaciones se resumen los aspectos técnicos y organizativos que serán necesarios para la prestación del servicio de aerotaxi.

Cabe mencionar que en el futuro habrá empresas que se dedicarán exclusivamente a la parte operativa del proyecto, desarrollando infraestructuras propias, pero siguiendo modelos de aerotaxis que ya existan.

De igual manera que para la parte operativa, también habrá otras empresas dedicadas a realizar el estudio económico financiero, que este proyecto no determina.

6.1. Normativa reguladora

El primer paso, como se ha comentado en apartados anteriores, será que el regulador de aviación europeo certifique los aparatos y dé luz verde para poder volar.

A parte, se tendrán que solicitar dos tipos de licencias/certificados:

- Certificado de operador aéreo → documento en el que se debe acreditar que el operador en cuestión disponga de la capacidad profesional y organización para garantizar la operación de aeronaves en condiciones seguras. La forma de operar debe ser de acuerdo con los procedimientos aprobados en el Manual de Operaciones.
- Licencia de explotación → habilita al titular de la aeronave para la prestación de servicios aéreos.
- Permiso comercial de tráfico aéreo → no es necesario ya que el servicio aéreo que se ofrece en este proyecto es nacional y este permiso es necesario para el transporte fuera de la Unión Europea.

6.2. Infraestructura

Como se lleva mencionando a lo largo del proyecto, no se contempla la creación ni existencia de infraestructuras destinadas al despegue y aterrizaje vertical de este tipo de vehículos. No obstante, cuando exista la infraestructura, se tendrá que contratar un servicio de estacionamiento para los aerotaxis, para poder dejarlos alojados en momentos en los cuales no se va a prestar el servicio. Evidentemente, este estacionamiento tendrá un coste asociado.

6.3. Recursos humanos

Para la prestación del servicio se necesitan personas que se encarguen de diferentes tareas.

Algunas actividades, las que tienen relación directa con la prestación del servicio, requerirán personal de plantilla. Para otras actividades que precisen conocimientos más específicos, como por ejemplo mantenimiento de las aeronaves o servicios informáticos, se subcontratarán entidades externas.

Durante los primeros años un mismo rol podrá desempeñar diferentes funciones. No obstante, a medida que vaya creciendo el negocio (a medio/largo plazo), será más factible contratar a más personas según su perfil y funciones a desarrollar.

6.4. Recursos financieros

La inversión inicial para dotar a la empresa de capital será muy elevada. No solo por el pago de las aeronaves, sino que también por los costes asociados a las campañas de marketing, inicio de operaciones; entre muchas otras.

Para ello, se recurrirá a una financiación externa. Se puede pedir un préstamo para proyectos empresariales, a través de una entidad bancaria. Para no tener que solicitar un periodo de carencia, ya que implicará tener que asumir mayor cuota del préstamo durante un periodo determinado incrementando los costes de intereses, se pensará en solicitar dos préstamos: uno para los bienes de inversión y otro para dotar a la empresa de liquidez durante los inicios.

6.5. Eficiencia energética y recarga de baterías

Antes de hablar sobre cada uno de ellos, se van a dar más detalles sobre las características del Lilium Jet.

Las dimensiones exactas de la aeronave no son conocidas, como tampoco su peso. Lo que se conoce es que, la primera versión de la aeronave tenía un peso en vacío de 680 kg y una carga útil de 200 kg. No obstante, la capacidad de este primer modelo era de 2 pasajeros. Si se extrapolan los valores del peso en vacío y de la carga útil para 5 pasajeros, modelo que se estudia en este trabajo, deberían ser de unos 1.700 kg y 500 kg; respectivamente. El peso de la batería, según un estudio matemático publicado por una universidad italiana [3], es de 900 kg aproximadamente.

El Lillium Jet debe tener una eficiencia competitiva si se compara con otros aerotaxis o helicópteros. Eso se debe, principalmente, a dos razones.

La primera es su tipo de propulsión. Al ser con tracción vectorizada, permite optimizar el rendimiento de los motores en vuelo horizontal. Realizando un rápido análisis mecánico, el rendimiento mecánico es mayor cuando la dirección de tracción tiene el mismo sentido que el de la trayectoria. Esto no ocurre en el caso de los helicópteros, ya que estos tienen las hélices horizontales.

La segunda es debido a la presencia de alas fijas en la aeronave. Esto genera automáticamente una sustentación que reduce la energía consumida para el vuelo horizontal. Es por eso por lo que no utiliza de manera exclusiva la fuerza de sustentación dada a la rotación de las hélices. La sustentación que generan las alas fijas hace que los motores puedan funcionar únicamente al 10% de su potencia máxima y, así, mantener su jet a una velocidad elevada.

Como tiene buena eficiencia energética, se pueden utilizar baterías eléctricas que ya están disponibles en el mercado. El director comercial de Lillium afirma que las baterías de su aeronave podrían ser como las de los coches eléctricos más grandes que existen. Las baterías del Lillium Jet podrían asemejarse a las de los últimos coches de Tesla⁴¹.

Las baterías más potentes producidas por Tesla [4] tienen 100 kWh y pesan, aproximadamente, 600 kg. De esta manera, su eficiencia es de:

$$\varepsilon_{tesla} = \frac{100.000}{600} = 166,7 \text{ Wh/kg}$$

Ecuación 28: Cálculo eficiencia batería Tesla

Como se ha dicho recientemente, el peso estimado de las baterías de Lillium es de 900 kg. Por tanto, si se realiza la hipótesis de que las baterías tienen la misma eficiencia a las de Tesla, se puede estimar una batería de:

⁴¹ Dato extraído de un vídeo de TEDX talks.

$$\text{Batería Liliium Jet} = \varepsilon_{tesla} \cdot \text{peso batería} = 150.030 \text{ Wh/kg} \approx 150 \text{ kWh/kg}^{42}$$

Ecuación 29: Cálculo capacidad batería Liliium Jet

A partir de Tesla también se puede conocer el tiempo de recarga de las baterías. Los cargadores tradicionales de esta marca de coches eléctricos permiten una recarga total en 7h y los nuevos cargadores una recarga del hasta el 80% de la batería en únicamente 45 minutos. Para el caso del aerotaxi, es evidente que se necesitarán estos nuevos cargadores en las estaciones.

Otra alternativa para solucionar el problema de la autonomía de las baterías es cambiar las baterías eléctricas al llegar a la estación, para disminuir el tiempo de no utilización.

Así pues, se presentan en más detalle las dos alternativas recientemente explicadas:

Nota aclaratoria: Aunque en el apartado de planteamiento de rutas se han propuesto rutas de ida y vuelta, en este proyecto no se estudia en detalle la ruta de vuelta Valencia – Barcelona. Pero se da por hecho que la flota de vehículos que llega de Barcelona se queda en Valencia para volar de nuevo a Barcelona (con diferentes pasajeros según demanda).

1) Cambiar la batería en la misma estación:

Se propone el uso de un sistema robotizado para el cambio de las baterías, como el que desarrolló Tesla, en la misma estación. En caso de tener un sistema como tal, habría una zona destinada para ello. Puede realizarse el cambio completo de una batería con bajo nivel de carga por otra al 100% de carga en tan solo 90 segundos. No obstante, el sistema robótico es muy complejo y aumenta los costes operativos.

2) Recargar la batería con el cargador rápido en poco menos de 1h:

Lo ideal es disponer, como mínimo, de un cargador rápido en la estación de Barcelona y un cargador rápido en la estación de Valencia. De esta manera, se optimiza el factor de utilización de los aerotaxis. Esta alternativa también ofrece una desventaja, y es que disminuye la eficacia de las baterías a largo plazo.

⁴² Valor muy variable según vaya evolucionando esta tecnología.

Se opta por la primera alternativa, que consiste en el cambio de baterías, para exprimir al máximo el factor de utilización de los aerotaxis.

6.6. Mantenimiento

Como cualquier vehículo, el Lillium Jet necesita diferentes tipos de mantenimiento con el objetivo de garantizar su seguridad y buen funcionamiento. Como todas las cosas, las aeronaves requieren mantenimientos correctivos y preventivos. Estos son los siguientes:

- Mantenimiento en línea

Incluye revisiones diarias antes del primer vuelo del día, inspecciones rápidas antes de cada vuelo e inspecciones cada 100h de vuelo para comprobar el buen funcionamiento de todos los aspectos de seguridad del aerotaxi.

- Mantenimiento menor

Incluye revisiones variables según la intensidad y frecuencia: muy frecuentes y rápidas, frecuentes y extensas, menos frecuentes y más extensas. Dichas revisiones se identifican con las letras de la A a la D; siendo la A la más frecuente y rápida y la D la más compleja y extensa.

- Mantenimiento mayor

Consiste en una revisión muy compleja obligatoria. Requiere muchas horas y tiempo. También requiere ser realizado en hangares dedicados a este tipo de mantenimiento.

En las estaciones de aerotaxis el único mantenimiento que se hará es el primero, el mantenimiento que incluye revisiones diarias, inspecciones rápidas antes de cada vuelo e inspecciones cada 100h de vuelo. Los tiempos exactos de cada uno de estos mantenimientos en la estación no se pueden conocer en un proyecto que todavía no existe. No obstante, la aeronave de Lillium, que destaca por su simplicidad, permite reducir el tiempo y coste de mantenimiento. Eso quiere decir que no se verán afectados en la optimización del tiempo del servicio. Esto es positivo ya que los tiempos son muy exigentes para las aeronaves.

Los mantenimientos menor y mayor se harán en hangares específicos, ya que a parte de ser necesario por las herramientas y *testing* necesario, realizar estos mantenimientos en una estación de aerotaxi entorpecerían la gestión en ellas.

6.7. Flota de aeronaves y gestión

Es importante definir la flota necesaria de aeronaves para prestar el nivel de servicio con la máxima eficiencia y eficacia posible.

Como se ha visto en el apartado de la estimación de la demanda futura (*Tabla 12*), se prevé que un 44,6% de personas que realizan la ruta Barcelona – Valencia escojan la forma de movilidad del aerotaxi, es decir, 1.107 pasajeros/día.

Teniendo en cuenta los datos de la variación de la demanda en función de la hora (*Gráfico 4*), se ha dimensionado la flota de aerotaxis necesaria (teniendo en cuenta una ocupación media de 4,5 pasajeros/aeronave) con el único objetivo de cubrir la demanda. Con estos cálculos se ha estimado que son necesarios 30 vehículos.

Se ha calculado el factor de utilización para una flota de 30 aeronaves (*factor de utilización 1*). No obstante, este valor es muy bajo en la mayor parte del día. Por esta razón, se ha decidido dimensionar la flota en 20 aeronaves, incrementando así en un 50% el factor de utilización de los aerotaxis (*factor de utilización 2*).

Hora	Porcentaje de demanda	Personas	Dimensionamiento de la flota	Factor utilización 1	Factor utilización 2	Diferencia %
7:00	8%	89	20	0,67	1,00	50%
8:00	11%	122	27	0,92	1,38	50%
9:00	4%	44	10	0,33	0,50	50%
10:00	2%	22	5	0,17	0,25	50%
11:00	3%	33	7	0,25	0,38	50%
12:00	4%	44	10	0,33	0,50	50%
13:00	5%	55	12	0,42	0,63	50%
14:00	12%	133	30	1,00	1,50	50%
15:00	9%	100	22	0,75	1,13	50%
16:00	3%	33	7	0,25	0,38	50%
17:00	4%	44	10	0,33	0,50	50%
18:00	5%	55	12	0,42	0,63	50%
19:00	6%	66	15	0,50	0,75	50%
20:00	8%	89	20	0,67	1,00	50%
21:00	4%	44	10	0,33	0,50	50%
22:00	3%	33	7	0,25	0,38	50%
23:00	2%	22	5	0,17	0,25	50%
0:00	2%	22	5	0,17	0,25	50%
1:00	1%	11	2	0,08	0,13	50%
2:00	1%	6	1	0,04	0,06	50%
3:00	0%	3	1	0,02	0,03	50%
4:00	0%	3	1	0,02	0,03	50%
5:00	1%	11	2	0,08	0,13	50%
6:00	2%	22	5	0,17	0,25	50%

Tabla 13: Dimensionamiento de flota y factores de utilización. Fuente: propia

Como se puede observar, en algunos momentos del día el factor de utilización es superior a la demanda (superior a 1) y, por tanto, el servicio de aerotaxi no la satisface. Para que esto no ocurra, se puede pensar en incrementar el precio del servicio en horas punta y disminuirlo en horas valle para que así la demanda se redistribuya a lo largo del día; atrayendo al público a volar en esas horas valle, ya que el precio del billete será más económico que el precio normal. Se podría determinar un modelo de *pricing* dinámico que tenga en cuenta la fluctuación de los precios según la demanda. De esta manera, también se conseguirá maximizar los ingresos en horas de máxima demanda. A parte, se conseguirán reducir los costes totales (fijos y variables) de la flota, a parte de reducirse el coste total de adquisición de la flota, el coste de operación por aeronave, el coste de mantenimiento del aerotaxi; entre otros.

Cabe destacar que es necesario contar con una flota de aerotaxis de reserva, como mínimo uno, para poder suplir la demanda en caso de que existan incidencias en alguno de ellos durante la jornada.

De esta manera, se dimensiona la flota en 21 aeronaves.

6.8. Sistema de reserva

El usuario podrá comprar el billete del aerotaxi mediante una aplicación móvil (disponible en iOS y Android) o web, que se llamará Taxi & Fly.

El objetivo de esta aplicación es interconectar a usuarios que quieran realizar la misma ruta en la misma fecha y hora, con el objetivo de que puedan compartir aeronave.

Una vez descargada esta aplicación, de tarifa gratuita, el usuario deberá registrarse en la plataforma con un correo electrónico y seleccionar una contraseña.



Figura 19: Pantalla de inicio de la aplicación. Fuente: propia

Una vez el usuario está registrado, accede a una pantalla principal de la aplicación que se divide en los siguientes apartados:



Figura 20: Pantalla principal de la aplicación. Fuente: propia

- Horarios: en este apartado el usuario podrá filtrar por origen, destino, día y hora para ver los diferentes vuelos que ofrece el aerotaxi.
- Disponibilidad: en este apartado el usuario podrá conocer en tiempo real si queda algún sitio disponible en los vuelos programados para el día escogido.
- Compra: este apartado consta de 5 pasos. Para facilitar en qué fase del proceso de compra se encuentra el usuario, habrá una guía en la parte superior que lo indicará. De esta manera, será un proceso fácil e intuitivo para todos los públicos. Los pasos se detallan a continuación:
 1. El usuario puede escoger la estación origen y destino, el día y la hora según sus necesidades. También tendrá la opción de seleccionar si desea comprar un billete de ida o si quiere comprar uno de ida y vuelta; seleccionando los correspondientes para cada caso. En cada opción aparecerá la hora de salida, duración del trayecto, hora de llegada y más detalles.
 2. El usuario podrá seleccionar el número de billetes (adultos/niños/bebés) que quiere comprar.
 3. Una vez se llegue al tercer paso, al usuario le aparecerá un resumen de su viaje: billete/billetes escogidos, origen y destino, día y hora. Esto facilita que el usuario esté seguro previamente al último paso, el proceso de compra del billete.
 4. El usuario podrá escoger el método de pago deseado y completará los detalles de su tarjeta.

5. El usuario tendrá tres opciones para obtener su billete, con el objetivo de permitirle elegir la forma que desee:
 - Imprimir el billete en formato pdf.
 - Enviar el billete por correo electrónico.
 - Obtener un código QR conforme la compra del billete.
- Avisos e incidencias: en este apartado se podrán conocer posibles incidencias, si hubiera, del aerotaxi. Se podrá conocer en tiempo real la hora a la cual aterrice en el vertipuerto y se avisarán de posibles retrasos, en caso de que los hubiera, aunque se prevé que no los haya.
- Cambio de billete: en caso de que el usuario tuviera un billete comprado que quiera cambiar, este apartado servirá para poder hacerlo. No solo podrá cambiar de fecha/hora, sino que también podrá anularlo; respetando el margen de 24h de antelación.
- Ayuda: permite contactar con el servicio al cliente para hacer consultas o solucionar otras posibles incidencias.

6.9. Coste del transporte

El precio por pasajero y km varía significativamente a corto y medio plazo. A corto plazo, la inversión requerida y la tecnología disponible encarecen enormemente los costes del servicio. Esta inversión repercute en el precio que pague el cliente, ya que sino no es un proyecto rentable.

No obstante, esta nueva forma de movilidad que supone el aerotaxi disminuye significativamente el precio que tendrá que pagar el pasajero a largo plazo, ya que es un vehículo autónomo (no requiere piloto) o que se puedan rentabilizar economías de escala cuando el proyecto tenga una posición más predominante en el mercado. Por tanto, se espera más demanda de servicio en el mercado.

Lilium anticipó que el precio inicial total por trayecto, en un recorrido de Manhattan hasta el aeropuerto de JFK de Nueva York (20 km aéreos), tendría un precio total de 70\$ [5]. A medio plazo, estimaron un precio de 25\$. Y, a largo plazo, de 9\$.

Para estimar un precio orientativo por pasajero y km, se ha consultado también un informe realizado por Uber Air [6] de 2016. Este estudio compara y estima los costes del servicio a corto, medio y largo plazo de los vehículos VTC, coches privados y VTOL's (costes por trayecto de aeronave y km).

El informe destaca los eVTOL como una buena alternativa a los otros modos de transporte, ya que su uso genera rentabilidad a largo plazo.



Figura 21: Coste/distancia de diferentes vehículos. Fuente: Uber Elevate

Se puede comprobar que, inicialmente, los precios en el eVTOL son muy superiores a los del vehículo privado, pero inferiores a los de UberX (UberPool no existe en España).

Si se trasladan estos precios a €/km·pasajero⁴³:

⁴³ A fecha 2/01/2022, 1 \$ = 0,88 €⁴³ y 1 milla = 1,61 km⁴³. Desglose de cálculos disponible en el Anexo 10.

	Lilium Aviation	UberX	Estimación coste
	Precio (€/km·pasajero)	Precio (€/km·pasajero)	Precio (€/km·pasajero)
Corto plazo	0,68	1,58	0,96
Medio plazo	0,24	0,52	0,33
Largo plazo	0,09	0,25	0,14

Tabla 14: Precios por pasajero y kilómetro. Fuente: propia

Se ha utilizado el precio inicial de 70\$ por 20 km para Lilium, disminuyéndose según la ratio dicha más arriba para establecer el precio a medio y largo plazo y contando que la ocupación media del aerotaxi es de 4,5 pasajeros, ya que no es realista tener en cuenta que el aerotaxi estará siempre lleno.

Para estimar el precio del Uber Air se han tenido en cuenta los precios por pasajero y milla de la *Figura 21*, contando con una ocupación máxima de 3,5 pasajeros por el mismo motivo que antes.

Para obtener un precio estimado, se ha hecho la media de los precios (€/km) del Lilium Jet y del Uber Air. Sobre este coste, se ha tenido en cuenta una ocupación media de 4,5 pasajeros, debido a que la aeronave que se estudia en el proyecto, el Lilium Jet, tiene una capacidad máxima de 5 pasajeros.

Conclusiones

Este apartado cierra el trabajo de fin de máster, con el objetivo de garantizar el cumplimiento de los objetivos inicialmente propuestos.

El objetivo principal del proyecto es estimar la demanda del servicio de aerotaxis. Para llegar a este apartado, se ha seguido la siguiente hoja de ruta: estudio de mercado, selección de rutas, estudio de movilidad, modelo para predecir la demanda y validación de este. Todos estos pasos han permitido obtener el repartimiento modal en la situación futura, con la introducción del servicio del aerotaxi.

En el estudio de mercado se ha realizado una investigación de diferentes empresas encargadas de la construcción de sus propios vehículos, los eVTOL. Con el fin de acotar el trabajo, se ha aplicado un criterio de selección, en base a las necesidades, para escoger una sola aeronave y partir de ella para los posteriores apartados del proyecto. El aerotaxi escogido ha sido el Lillium Jet, con capacidad para 5 personas, autonomía de 300 km y que alcanza una velocidad máxima de 300 km/h.

Una vez escogida la aeronave, se ha establecido un primer filtrado, desde el punto de vista socioeconómico, para estudiar las posibles rutas del servicio de aerotaxis. A partir de esta primera selección, se ha aplicado un segundo filtrado, teniendo en cuenta las características técnicas del Lillium Jet, para la elección final de los trayectos que son viables con la aeronave.

Para no perder de vista el objetivo del proyecto, se ha decidido elegir una única ruta y en base a esta, desarrollar los siguientes apartados. La ruta seleccionada ha sido Barcelona – Valencia. Se ha realizado un estudio de movilidad a partir de datos reales proporcionados por el operador móvil, estadísticas de AENA y mapa de tráfico de la DGT. Con estos datos se ha podido cuantificar la demanda actual de los diferentes modos de transporte para llegar a Valencia.

El modelo Logit, aprendido en el máster de Ingeniería Industrial, se ha adaptado a las necesidades del proyecto para poder determinar el repartimiento modal no sólo con 3 modos de transporte (situación actual), sino que también con la introducción del nuevo modo (situación futura): el aerotaxi.

Para una correcta estimación, ha sido necesario previamente validar el modelo. Con los datos reales de la situación actual se han calibrado unos coeficientes, de manera que la probabilidad actual estimada se asemeje lo máximo posible a la actual real. El ajuste de los mínimos cuadrados ha permitido aceptar como bueno este modelo, gracias al ajuste tan bueno del coeficiente de determinación o R^2 , de valor 0,9157.

El modelo matemático ha permitido determinar el repartimiento modal en la situación futura y a medio plazo, estimando una demanda para la ruta de Barcelona – Valencia en aerotaxi del 44,6%.

Como se puede observar, este servicio tendrá una gran acogida a medio plazo, gracias a su optimización no solo del tiempo de recorrido, sino que también del tiempo de acceso y de espera. El coste estimado a medio plazo, calculado a partir de estudios realizados por empresas del sector (Lilium Aviation y Uber) es muy parecido al del coche y se encuentra en el rango del coste del avión y del tren. Este servicio es muy cómodo para el usuario y es normal vaya a tener este porcentaje significativo de demanda.

El objetivo secundario del proyecto es definir un modelo operativo para la implementación del servicio en la ruta. En este apartado se ha proporcionado información de algunos aspectos importantes como: el dimensionamiento de la flota de aerotaxis, operatividad del cambio de baterías, recursos humanos y financieros, coste del transporte, sistema de reserva, y mantenimientos necesarios de la aeronave. En general; aspectos necesarios para proporcionar una buena calidad del servicio.

La cuantificación de cada uno de estos resultados resulta complicada, pues es un servicio que aun no tiene certificaciones de vuelo y, por tanto, aun menos la parte operativa desarrollada. No obstante, la finalidad de este apartado es que el usuario no solo vea comodidad en la reducción del tiempo de viaje y la gestión operativa del servicio en conjunto; sino que vea el aerotaxi como una experiencia de vuelo.

Así pues, el proyecto aporta una metodología a seguir para la estimación de la demanda a partir de cualquier ruta. Aunque haya sido únicamente calculada para el trayecto Barcelona – Valencia, el razonamiento deductivo a seguir para cualquiera de las otras rutas es el mismo. La única diferencia serán los datos, ya que los números son muy diferentes según el trayecto objeto de estudio. Otro sentido lógico de haber realizado el estudio con una sola ruta es que, para algo tan novedoso, mejor realizar una prueba piloto y, poco a poco, ir extrapolando el modo de proceder al resto de rutas propuestas.

A nivel académico, el proyecto ha permitido la investigación de un tema muy innovador poco estudiado hasta ahora y que no está lejos de implementarse.

A nivel personal, el proyecto me ha permitido entender qué pasos seguir hasta llegar al objetivo. Me he encontrado con numerosos obstáculos, como la falta de información y datos para la elaboración de los cálculos. Al final, me ha permitido ofrecer una solución que se adapta muy bien a la realidad. Además, he podido ampliar mi cultura sobre los aerotaxis, un mundo que no conocía y que ha resultado tan interesante para mí.

Mucho queda aun por descubrir, y sobretodo, por volar y disfrutar.

Oportunidades futuras

Hay muchas preguntas sobre la inclusión de los aerotaxis en el paisaje urbano por cuestiones de seguridad, privacidad, viabilidad, contaminación... entre muchas otras. Esto puede ser motivo de rechazo a este modo de transporte. Dar a conocer las ventajas e inconvenientes, resaltando los puntos fuertes, de la nueva forma de movilidad será un punto clave en el éxito del proyecto.

Lilium Aviation tiene una posición muy prometedora en el mercado de los aerotaxis, con modelos de negocio muy equilibrados. El futuro decidirá si esto será suficiente para competir con otras industrias dinámicas del transporte; como las que se han visto en el apartado del estudio de mercado.

A pesar de los resultados proporcionados, y tal y como se ha ido explicando a lo largo de la memoria, el presente proyecto tiene algunas limitaciones que sobrepasan su ámbito y que podrían convertirse en oportunidades para investigaciones futuras.

La primera de ellas es la falta de datos precisos en general. Esto es debido al carácter innovador del mundo de los aerotaxis. Tiene sentido que, para un servicio tan diferente a los actuales, las empresas aeronáuticas (como Lilium) tengan una cultura de secreto. Los datos estimados en este proyecto podrían servir para validar o corregir los resultados obtenidos con los datos confidenciales que disponen estas empresas, con el objetivo de ajustarse todavía más a la realidad.

En cuanto a la demanda, hay incertidumbre sobre la adopción de esta nueva forma de movilidad. Pese a que se haya estimado una probabilidad del 44,6% de este nuevo modo de transporte a medio plazo, se podría realizar un estudio de demanda segmentando por tipo de clientes y realizar diferentes tipos de encuestas para comprobar que la estimación no solo es buena desde el punto de vista matemático, sino que también lo es desde el punto de vista sociológico.

La ausencia de datos en el ámbito operativo del aerotaxi es también una limitación a la hora de proponer un modelo. Esta parte podría ser completada con un estudio exhaustivo de operaciones, con el fin de cuantificar los apartados propuestos en el presente proyecto.

Otra posible continuidad del proyecto, y tras completar el modelo operativo, sería realizar un estudio económico, para evaluar la rentabilidad y viabilidad, o no, del mismo.

El ámbito de los aerotaxis debe evolucionar rápido y de manera correcta, ya que los cambios en este sector tan innovador transcurren rápidamente y habrá que adaptarse a los avances en el mundo del transporte.

¿Servirá el aerotaxi para aumentar conexiones entre diferentes comunidades, de diferentes niveles socioeconómicos? ¿Reforzará las desigualdades de movilidad? ¿Será realmente el uso del aerotaxi un beneficio significativo para la reducción de la contaminación del medioambiente? ¿Será el servicio asequible para todos los públicos, o será un transporte lujoso únicamente viable para algunos?

Dejamos que el futuro y la innovación puedan resolver algunas de las preguntas más comunes.

De todas formas, no cabe duda de que este proyecto no ha hecho más que empezar y que el interés por este tema tan revolucionario seguirá creciendo a pasos agigantados.

Agradecimientos

Una vez finalizado el proyecto, quiero agradecer a todas aquellas personas que han colaborado en su elaboración.

En primer lugar, agradecer a Carles Martínez-Marí, del departamento de Organización de Empresas, por su tiempo y dedicación durante el trabajo. Por sus consejos, correcciones, sugerencias y orientación, que han permitido la realización de este trabajo. También agradecerle por haberme puesto en contacto con su empresa, DataActions.

A la empresa DataActions, por todos los datos que me han facilitado y a Judit Boronat, que trabaja en la empresa, por sus aportaciones y comentarios y por su disponibilidad para resolver dudas.

También agradecer a Maria Antonia De los Santos Lopez, coordinadora de la asignatura de Transportes del MUEI, y a Vicente Medina, por su tiempo de dedicación y ayuda para conseguir un modelo de estimación de la demanda que se ajustara a las necesidades del proyecto.

Por último, a todo el equipo docente que forma parte del tribunal, por su tiempo dedicado a la corrección, presencia y deliberación en la exposición del proyecto.

A todos, gracias.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] AJUNTAMENT DE BARCELONA, *Informe de evaluación sobre la calidad del aire*. Fuente: https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/es/noticia/la-causa-principal-de-la-contaminacion-en-barcelona-es-el-trafico-de-vehiculos-privados_850706
- [2] ETSEIB - UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, *Transportes*. Ma. Antonia de los Santos López. 2007.
- [3] POLITECNICO DI TORINO, Department of Mechanical and Aerospace Engineering. *Electric VTOL Configurations Comparison*. Fuente: <https://www.mdpi.com/2226-4310/6/3/26>
- [4] TESLA, New Tesla Model S now the quickest production car in the world. Fuente: <https://www.tesla.com/blog/new-tesla-model-s-now-quickest-production-car-world>
- [5] LILIUM, Precio calculado en el recorrido Manhattan – JFK. Fuente: <https://www.xataka.com/automovil/lilium-taxi-volador-electrico-para-5-pasajeros-completa-su-primer-despegue-vertical-promete-su-llegada-comercial-para-2025>
- [6] UBER ELEVATE, *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation*. October 27, 2016. Fuente: <https://evtol.news/media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf>

Bibliografía complementaria

- [Aerotaxis y estaciones de aerotaxis:](#)

<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-15/flying-taxi-hubs-planned-for-65-cities-spanning-london-to-la>

<https://www.libremercado.com/2019-10-29/aerotaxi-uber-pruebas-plazas-kilometros-hora-1276646929/>

<https://evtol.com/>

<https://www.theverge.com/2020/11/11/21558670/lilium-jet-flying-taxi-orlando-vertiport-hub-evtol>

<https://sifted.eu/articles/uk-flying-taxi-hub-coventry/>

<https://www.imnovation-hub.com/es/transformacion-digital/taxi-drones-para-pasajeros-listos-para-despegar-en-dubai/>

<https://www.rtve.es/noticias/20210318/bordo-taxi-volador-china-no-ciencia-ficcion/2082842.shtml>

<https://www.mediotiempo.com/otros-mundos/taxis-voladores-corea-drones-transportaran-personas-video>

<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/evtol-elevated-future-of-mobility-summary.html>

<https://hablemosdeempresas.com/empresa/vertipuertos-urbanos-oportunidades-economicas/>

- Regulación y normativas:

<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-2007-0012-01-00-ENES.pdf>

<https://www.ittrends.es/actualidad/2018/10/como-sera-el-mercado-de-aerotaxis>

<https://www.faa.gov>

https://es.wikipedia.org/wiki/Organización_de_Aviación_Civil_Internacional

<https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/organismos-internacionales/oaci>

https://www.icao.int/SAM/Documents/2020-RLA06901-AISAIM/11_everis_ADS_Drones-AIM-OACI_Lima-20200513-v1.pdf

- Estudio de mercado:

<https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20190718/463576832743/taxi-volador-movilidad-ciudades-uber-tecnalia-airbus-audi.html>

<https://aertecolutions.com/2021/05/10/el-mercado-actual-de-los-aerotaxis/>

https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/01/27/companias/1611766845_894964.html

<https://www.volocopter.com/company/>

<https://www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/volocopter-caracteristicas-y-novedades-del-aerotaxi-electrico-587049>

<https://www.elboletin.com/un-aerotaxi-tripulado-realiza-el-primer-vuelo-de-prueba-en-singapur/>

<https://nmas1.org/news/2019/10/23/volocopter-singapur-easaprueba>

<https://www.eleconomista.es/status/noticias/10388938/03/20/Vertipuertos-y-taxis-voladores-asi-imagina-Airbus-la-ciudad-del-futuro.html>

- Lilium Aviation:

<https://www.infodron.es/id/2021/05/25/noticia-lilium-asocia-luxaviation-operar-vuelos-comerciales-europa.html>

<https://www.e-volt.es/lilium-acuerdo-historico-los-primeros-220-taxis-voladores-electricos-iran-a-brasil/>

<https://www.theverge.com/2019/5/16/18625088/lilium-jet-test-flight-electric-aircraft-flying-car>

<https://www.caranddriver.com/es/estilo-de-vida/a60086/lilium-jet/>

<https://www.elindependiente.com/economia/2019/10/22/asi-es-el-lilium-jet-taxi-volador-supera-ya-100-kilometros-hora/>

<https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-secures-90-million-in-series-b-funding-round>

<https://lilium.com/company>

- Planteamiento de rutas:

<https://www.distance.to/>

<https://www.google.es/maps/?hl=es>

<https://www.mitma.gob.es/carreteras/trafico-velocidades-y-accidentes-mapa-estimacion-y-evolucion/mapas-de-trafico/2019>

- Estimación de la demanda:

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_mobility_statistics#Passenger_car_occupancy

<https://www.skyscanner.es/>

<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/31937/TFM%20Bajard%2C%20Fabien.pdf?sequence=1>

- Costes de transportes:

<https://www.redtransporte.com/valencia/precios-abonos.html>

<https://www.fgc.cat/es/billetes/>

<https://www.renfe.com/es/ca/cercanias/cercanias-valencia/tarifas/bitllets>

<https://www.omio.com/trains/barcelona/castellon>

<https://www.omio.com/trains/barcelona/girona>

<https://www.omio.com/trains/barcelona/tarragona>

<https://www.balearia.com/es/rutas-horarios/ferry-barcelona-mallorca>

<https://www.balearia.com/es/rutas-horarios/ferry-barcelona-ibiza>

<https://www.skyscanner.es/transporte/vuelos/bcn/pmi>

<https://www.skyscanner.es/transporte/vuelos/bcn/ibz>

- Eficiencia energética y recarga de las baterías:

<https://www.tesla.com/blog/new-tesla-model-s-now-quickest-production-car-world>

- Mantenimiento de las aeronaves:

https://es.wikipedia.org/wiki/Revisiones_de_mantenimiento_de_aeronaves

<https://agsaca.aero/mantenimiento.html>

<https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=TIPOS+DE+MANTENIMIENTO+DE+LAS+AERONAVES+SEGUN+ÑA+AVIACION+ESPAÑOLA&ie=UTF-8&oe=UTF-8>

- Costes del aerotaxi:

https://evtol.news/_media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf

<https://www.motorpasion.com/industria/uber-muestra-como-sera-interior-sus-taxis-voladores-que-podriamos-ver-funcionando-2023>

<https://www.xataka.com/automovil/lilium-taxi-volador-electrico-para-5-pasajeros-completa-su-primer-despegue-vertical-promete-su-llegada-comercial-para-2025>

<https://evtol.com/news/uber-elevate-community-engagement/>

- Vídeos:

Vídeo disponible en Movistar Plus → Aviones eléctricos.

Vídeo disponible en TED talks (<https://www.youtube.com/watch?v=tDKmotEjvzY>) → Aircrafts with vertical take-off and landing will transform our lives – Remo Garber – TEDxZurichSalon.