



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER
ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA
DE UNA ESTACIÓN DE AEROTAXIS

Rodrigo Fernández del Río

Director: Dr. Antonio García y Garmendia

Madrid

Septiembre de 2019

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Estudio de Viabilidad Técnica de una Estación de Aerotaxis

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2019/20 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Rodrigo Fernández del Río

Fecha: **18** / **09** / **2020**

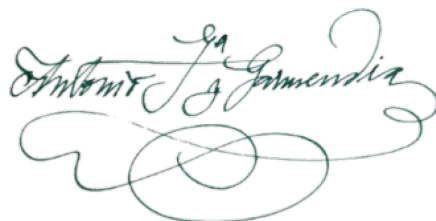


Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Antonio García de Garmendia

Fecha: **18** / **09** / **2020**



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

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

El autor D. Rodrigo Fernández del Río

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Estudio de Viabilidad Técnica de una Estación de Aerotaxis, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

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

3º. Condiciones de la cesión y acceso

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

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

4º. Derechos del autor.

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

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

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

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

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

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

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

Madrid, a **18** de **Septiembre** de **2020**

ACEPTA

Fdo. 

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER
ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA
DE UNA ESTACIÓN DE AEROTAXIS

Rodrigo Fernández del Río

Director: Dr. Antonio García y Garmendia

Madrid

Septiembre de 2019

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA DE UNA ESTACIÓN DE AEROTAXIS

Autor: Fernández del Río, Rodrigo.

Director: García de Garmendia, Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto consiste en la realización de un modelo híbrido representativo del funcionamiento de una estación de aerotaxis. Se han realizado sobre éste experimentos de optimización y simulación para determinar las variables óptimas de diseño, la calidad del servicio y el coste diario de operación, bajo unas condiciones particulares.

Palabras clave: Aerotaxi, Estación, Simulación, Agente, Evento Discreto, Sistema Dinámico, Helipuerto, Batería, Viajero.

1. Introducción

El coche volador ha sido durante mucho tiempo una suerte de tótem de la era futura. Se tienen constancia de múltiples acometidas históricas para construir un coche volador, todas ellas sin éxito. En la última década, sin embargo, han comenzado a desarrollarse prototipos de modelos que, gracias a la incorporación de los últimos avances tecnológicos (Inteligencia Artificial, Computación en la Nube, Drones, etc.) han conseguido realizar numerosos vuelos de prueba con éxito y cuyos fabricantes han prometido fechas de inserción en el mercado muy cercanas (a partir del año 2023, según Uber para su programa Elevate¹). El surgimiento de las tecnologías eVTOL (vehículos eléctricos de aterrizaje y despegue vertical) ha posibilitado la concepción de vehículos aéreos capaces tanto de maniobrar en espacios reducidos como ciudades como de alcanzar altas velocidades de crucero.

Se presenta, por tanto, el aerotaxi como una oportunidad novedosa de negocio para dar servicios de transporte privado aéreo a un coste mucho más asequible que el transporte privado aéreo convencional (que se realiza, por lo general, en helicóptero o avioneta) y que puede estar llamada a revolucionar el sector del transporte.

2. Definición del proyecto

Este Proyecto estudia la viabilidad técnica de una hipotética estación de aerotaxis. Lo hace valiéndose para ello de la simulación operacional.

Se ha construido un modelo de simulación híbrido utilizando la herramienta Anylogic que combina diferentes estrategias de modelado (a saber, DES, SD, ABS). Este modelo ha sido concebido de manera que aporte resultados relativos tanto a la viabilidad técnica (número óptimo de helipuertos y baterías que la estación debe poseer para operar de manera fluida), como a la calidad (previamente definida) y coste del servicio ofrecidos.

Se han realizado para ello tres experimentos sobre el modelo construido, que se han basado en una demanda consultada para la estación de Atocha (Madrid)¹. En el primero se ha determinado el número óptimo de helipuertos necesarios para dar un servicio de

calidad. En el segundo, una vez conocidos el número de helipuertos, se ha hallado el número óptimo de baterías para dar un servicio ininterrumpido. En el tercero se ha rediseñado el modelo atendiendo a los dos experimentos anteriores para cuantificar la calidad y obtener el coste diario de la estación.

3. Descripción del modelo

El modelo diseñado basa su estructura en una red de agentes siendo la propia estación el de jerarquía superior y en el que habitan los otros agentes. En este agente principal Estación se ha recreado una infraestructura que representa una estación de aerotaxis con tres niveles: recibidor, sala de embarques y espacio aéreo. Se han añadido también elementos de lógica espacial que permiten a los agentes del modelo interactuar con la infraestructura y desplazarse a través de ella. Además, se han diseñado dentro de este agente los diagramas de flujo de eventos discretos que definen la lógica de los movimientos de los agentes. También se han implementado en el agente principal cuatro bancos de recursos que gestionan la asignación de helipuertos y la carga y descarga de las baterías. En el caso de las baterías, su gestión en la estación se realiza a través de dos bancos de recursos, uno para baterías cargadas y otro para las que aún se encuentran en proceso de carga. El cuarto banco de recursos se encarga de retirar las baterías del sistema cuando el vehículo abandona la estación.

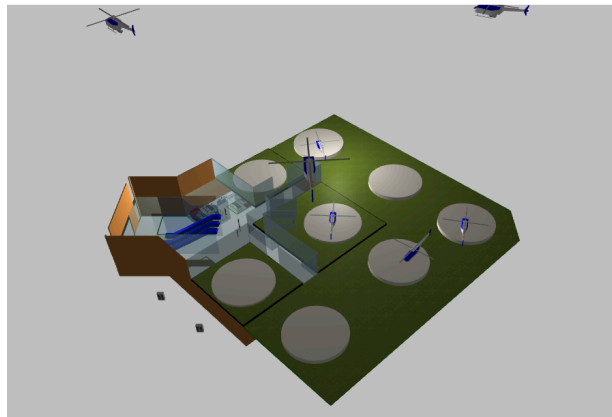


Ilustración 1 – Vista 3d de la estación en funcionamiento. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

Los otros agentes del modelo son los siguientes:

- **Aerotaxi:** Su diagrama de estados realiza transiciones entre cinco estados; aterrizaje, despegue, vuelo de crucero, espera y cambio de batería.
- **Viajero:** Presenta los estados: andar, espera y montado en aerotaxi.
- **Batería:** Estados: carga, descarga, reposo. En el caso de la batería se ha definido también un sistema dinámico valiéndose del modelado SD que recrea el comportamiento basado en ecuaciones diferenciales del proceso de carga y descarga de la batería por medio de un flujo entrante y otro saliente a un depósito que representa la variable del nivel de la batería. De esta manera, se activa un flujo, otro, o ninguno en función del estado de la batería.

- **Helipuerto:** Estados: Ocupado, disponible. En este caso también se ha incorporado un nivel al agente situado a la misma altura que el espacio aéreo de la estación.

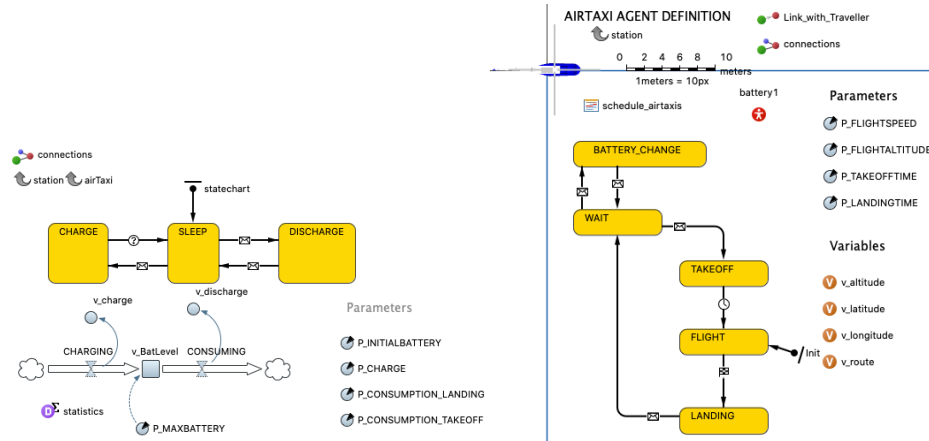


Ilustración 2 – Ejemplos de diagramas de estados para los agentes Bateria (izda.) y Aerotaxi (dcha.).

Fuente: Elaboración Propia en Anylogic.

4. Resultados

Se han realizado tres experimentos con el modelo diseñado. Para los tres se ha introducido una tasa de llegadas de aerotaxis y viajeros basados en una demanda de referencia² para la estación de Atocha en Madrid.

- En el primer experimento se ha ejecutado el modelo iterando varias veces con distintos valores para el número de helipuertos (d_p). Se ha obtenido la evolución temporal de los tiempos de espera para viajeros y aerotaxis, tanto su evolución temporal en formato gráfico como unos intervalos de confianza para su valor medio. Se ha analizado esta información para determinar como número óptimo de helipuertos $d_p^* = 8$.
- El segundo experimento, que incorpora los hallazgos del anterior, permite hallar el número óptimo de baterías (d_b^*) para que la estación funcione de manera ininterrumpida. Se ha obtenido la evolución temporal de la población de baterías baterías cargadas y descargadas y se ha aplicado un margen de seguridad de 30 baterías, siendo el resultado $d_b^* = 87$.
- El tercer experimento vuelve a hacer uso de los resultados de los anteriores para determinar dos indicadores de calidad que toman los tiempos medios de espera de aerotaxis (K_{QA}) y viajeros (K_{QV}), así como el coste (C_D) de operación de la estación durante un día de simulación. Se obtienen los siguientes resultados:

$$K_{QA} = 1,92 \quad K_{QV} = 1,06 \quad C_D = 4909\text{€/Día}$$



Ilustración 3 – Tiempos de espera de aerotaxis (arriba) y pasajeros (abajo) para una simulación en el primer experimento.

5. Conclusiones

El modelo desarrollado muestra en simulación el comportamiento esperado, lo cual puede comprobarse de manera visual mediante la animación habilitada.

El modelo permite anticipar correctamente variables de diseño importantes como son el número de helipuertos y de baterías necesarios para operar la estación. También permite variar la ubicación espacial de los helipuertos.

Además, es capaz de responder a las preguntas sobre viabilidad técnica, calidad y coste formuladas en su concepción. Lo hace además arrojando resultados que se asemejan a los esperados para una estación de aerotaxis, con tiempos de espera medios de uno y dos minutos para aerotaxis y pasajeros, respectivamente.

6. Referencias

- [1] Uber Air, 2020. www.uber.com
- [2] Plaza, L., 2019. *Planificación de la Logística y Actividad Económica del Servicio de Aerotaxi Eléctrico en Madrid*, ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

TECHNICAL FEASIBILITY STUDY OF AN AIRTAXI STATION

Author: Fernández del Río, Rodrigo.

Supervisor: García de Garmendia, Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Project consists on the development of a hybrid simulation model which is able to represent the behavior of an air-taxi station. Optimization and simulation experiments were then run on the model in order to determine the optimal variables for its design, the quality of service and the daily operational cost, under certain given conditions.

Key words: Air-taxi, Station, Simulation, Agent, Discrete Event, System Dynamics, Heliport, Battery, Traveller.

1. Introduction

Flying cars have long been a symbol of the years to come. There are records of multiple historic attempts to build one with few or no success. Over the last decade, however, the development of new prototypes based on eVTOL technology has brought the concept of an air-taxi back to the table (partly thanks to their embrace of state-of-the art technologies, e.g. drones, AI, cloud computing, etc.) , with test models having already thousands of flight hours on their records and manufacturers promising surprisingly close kick-off dates (Uber intends to make its Elevate program available to the public by 2023)¹. These vehicles are capable of both maneuvering in enclosed spaces like cities and cruising long distances at high speeds, catching the attention of the private transportation sector.

Air-taxi is presented as a new business opportunity that could provide private air transportation services at a lower price than their conventional counterparts (which are usually carried out by means of helicopters and small planes, both having fuel engines)

2. Project definition

This Project studies the technical feasibility of a hypothetical air-taxi station. It does this through operational simulation.

A hybrid model of the station was built on the Anylogic tool, which combines different modeling approaches (DES, SD, ABS). The model has been developed in a way that answers questions relative to the technical feasibility (optimal number of heliports and batteries that the station should possess to ensure a fluid service), the quality and the cost of the service.

Three experiments were run on the model, based on the reference-data for the demand provided for the Atocha station in the city of Madrid.² In the First experiment, the optimal number of heliports to give a quality service was determined. On the second experiment, the optimal battery stock to allow a continuous service was calculated. On the third, the model was re-run incorporating the previous results to compute the quality of the service as well as the daily cost of the station.

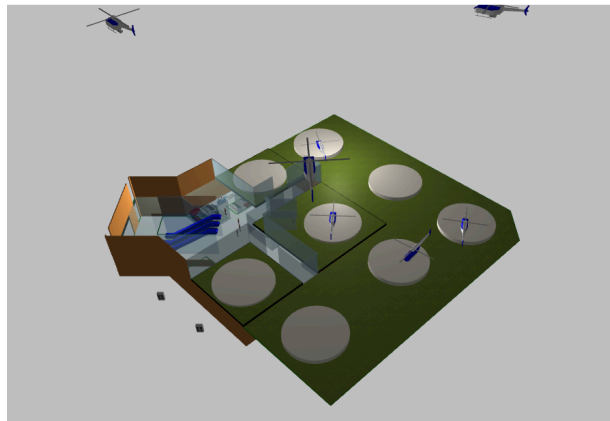


Figure 4 – 3D Simulation view of the station. Source: Own (Anylogic).

3. Description of the Model

The model structure is agent-based, being the station the top-level agent where the other agents of the model live. In the environment of this agent, an infrastructure was created representing an air-taxi station with three levels: ground floor, port level and sky level. Space markup elements were also added to allow the other agents of the model to move through and interact with the building. Discrete-event-based process flowcharts describing the behavior of the agents were also added onto the main agent, as well as four resource pool objects which manage the assignment of heliports to the incoming air-taxis and the battery supplies. The battery supply is managed by two of the pools, one for charged and one for discharged batteries, being the fourth pool in charge of managing the batteries which leave from and arrive at the station.

Other agents in the model include the following:

- **Air-taxi:** Its state diagram transitions between five states: take-off, landing, cruise flight, wait and change battery.
- **Traveller:** States: walking, waiting and aboard vehicle.
- **Battery:** States: charge, discharge, rest. In this case the agent definition includes a dynamic system which represents the charging/discharging process through one incoming and one outgoing flow that feed a stock representing the battery level. Depending on the state of the agent, one flow, the other, or none of them are activated.
- **Heliport:** States: idle, busy. In this case a second level at the same altitude as the station sky level was implemented inside the agent.

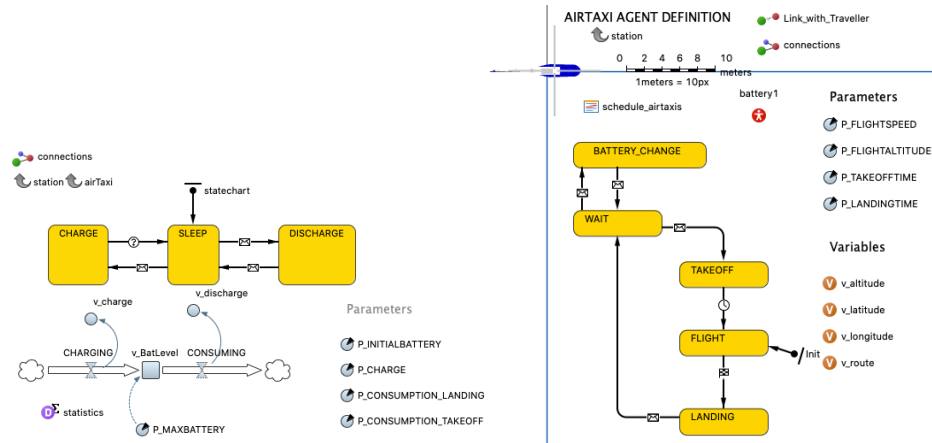


Figure 5 – Statechart diagram examples for the agents Battery (left) and Air-taxi (right). Source: Own (Anylogic).

4. Results

Three experiments were carried out with the designed model. All three of them make use of an arrival rate Schedule for air-taxis and travellers based on a reference demand for the station of Atocha in Madrid².

- On the first experiment, the model was executed in several iteration steps varying the number of heliports (d_p) between runs. Results included time-series plots for the waiting times of air-taxis and travellers as well as the mean values and confidence intervals of both waiting times after several replications. Upon analysis and discussion the optimal number of heliports was found to be $d_p^* = 8$.
- The second experiment, which makes use of the previous findings, allows to find the optimal size of the battery stock (d_b^*) for the station to offer a continuous service. The time plot showing the evolution of the battery population in the station, showing charged and discharged batteries was obtained. After applying a safety margin stock of 30 batteries, the end optimal results in $d_b^* = 87$.
- The third experiment, again making use of the results of the prior, determines the quality indicators for the waiting times of air-taxis (K_{QA}) and travellers (K_{QV}), as well as the operations cost (C_D) of the station during one day of simulation. The results obtained are as follows:

$$K_{QA} = 1,92 \quad K_{QV} = 1,06 \quad C_D = 4909\text{€/Day}$$

5. Conclusions

The developed model shows the expected behavior in simulations, which can be visually checked by means of the enabled animations.

The model allows the correct anticipation of important design parameters such as the number of heliports and batteries necessary to run the station. The spatial distribution of these heliports in the station infrastructure can also be customized.

Moreover, the model is capable of answering the questions regarding technical feasibility, quality and cost which were formulated prior to its conception. It does this

through results that resemble the expected for an air-taxi station, with waiting times of around one and two minutes for air-taxis and passengers, respectively.



Figure 3 – Waiting times of air-taxis (above) and travellers (below) for one replication in the first experiment. Source: Own (Anylogic).

6. References

- [1] Uber Air, 2020. www.uber.com
- [2] Plaza, L., 2019. *Planificación de la Logística y Actividad Económica del Servicio de Aerotaxi Eléctrico en Madrid*, ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

I
MEMORIA DE PROYECTO

Índice de Contenido

1.	<i>Introducción y Motivación</i>	5
1.1.	Motivación	10
1.2.	Objetivos del Proyecto	12
2.	<i>Descripción de las Tecnologías</i>	17
2.1.	Simulación	18
2.2.	Simulación Operacional frente a Simulación Matemática	19
2.2.1.	Simulación de Eventos Discretos (Discrete Event Simulation o DES).....	20
2.2.2.	Simulación de Sistemas Dinámicos (System Dynamics o SD).....	21
2.2.3.	Simulación Basada en Agentes (Agent-Based Simulation o ABS).....	21
2.3.	Elección de la Herramienta de Simulación	22
3.	<i>Antecedentes Históricos y Estado de la Cuestión</i>	25
3.1.	Del Taxi al Aerotaxi: Un nuevo paradigma	27
3.2.	El Aerotaxi: Tecnología	31
3.3.	El Aerotaxi: Estudios Previos	34
3.4.	El Aerotaxi y la Simulación: Estudios Previos	36
3.5.	Patentes	38
3.6.	Conclusiones del Capítulo 3	39
4.	<i>Definición del Problema</i>	41
4.1.	Descripción y Funcionamiento de la Estación	44
4.1.1.	Descripción de la infraestructura.....	44
4.1.2.	Servicios	45
4.1.3.	Funcionamiento Normal de los Aerotaxis	46
4.1.4.	Funcionamiento Normal de la Estación.....	48
4.2.	Identificación de los Agentes, Flujos y Procesos	49
4.2.1.	Agentes del Modelo	49
4.2.2.	Flujos y Depósitos (Sistemas Dinámicos).....	50
4.2.3.	Procesos y Eventos (Eventos Discretos).....	51
4.3.	Definición de las Variables y Parámetros de Simulación	53
4.4.	Desarrollo del Modelo Conceptual	55
4.5.	Supuestos	60
4.6.	Conclusiones del Capítulo 4	61
5.	<i>Desarrollo del Modelo de Simulación</i>	63
5.1.	La Estación: Agente Principal	65

5.1.1.	Nivel 0: GroundLevel	67
5.1.2.	Nivel 1: PortLevel.....	69
5.1.3.	Nivel 3: SkyLevel.....	71
5.1.4.	La Estación con un Número de Puertos Variable.....	72
5.2.	Otros Agentes del Modelo	74
5.2.1.	Agente Aerotaxi.....	74
5.2.2.	Agente Viajero.....	76
5.2.3.	Agente Batería.....	77
5.2.4.	Agente Helipuerto.....	80
5.3.	Sistemas Dinámicos: Diagramas de Flujos y Depósitos.....	81
5.3.1.	Nivel de la batería.....	81
5.3.2.	Costes de la estación.....	81
5.4.	Diagramas de Flujo de Eventos Discretos.....	82
5.4.1.	Llegadas y salidas de aerotaxis a la estación.....	82
5.4.2.	Flujo de viajeros en el interior de la estación.....	85
5.4.3.	Flujo de transeúntes en el interior de la estación.....	86
5.4.4.	Flujo de baterías.....	88
5.5.	Integración Conjunta del Modelo y Relación con los Objetivos de Modelado.....	89
5.5.1.	Gestión de los Bancos de Recursos.....	89
5.5.2.	Alineación con los objetivos de modelado.....	91
5.6.	Conclusiones del Capítulo 5.....	94
6.	<i>Aplicación del Modelo</i>	95
6.1.	Resultados de los Experimentos de Simulación	97
6.1.1.	Experimento I: Aplicación del Modelo para Calcular el Número Óptimo de Helipuertos.....	98
6.1.2.	Experimento II: Determinación del Número Óptimo de Baterías.....	104
6.1.3.	Aplicación del Modelo Optimizado para el Cálculo de Indicadores.....	108
6.2.	Conclusiones del Capítulo 5.....	114
7.	<i>Conclusiones y Desarrollos Futuros.....</i>	115
7.1.	Conclusiones del Proyecto.....	117
7.2.	Desarrollos Futuros.....	120
	<i>Bibliografía.....</i>	123
	Presupuesto de Proyecto	127
	Anexo: Relación con los O.D.S. de la O.N.U.	131
	Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.....	131
	Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.	131
	Objetivo 11: Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.	132
	Objetivo 15: Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica.....	133
	Anexo: Gráficos.....	135

1. Introducción y Motivación

“Essentially, all models are wrong, but some are useful”

-George Box (1987)-

La ingeniería de proyectos encuentra siempre en el coste un obstáculo hacia la calidad. Debe intentar reducir al máximo el coste del proyecto en sí, así como el propio coste de desarrollo y diseño del Proyecto. En construcción y transporte, este coste es especialmente elevado, pues incluye normalmente la creación de prototipos, edificios piloto, etc., cuyo único propósito es el de probar la tecnología a implementar antes de llevar a cabo la ejecución final, permitiendo así detectar fallos de diseño o seguridad antes de que éste sea llevado al público o bien probar determinadas características del sistema..

La simulación permite crear un prototipo virtual del proyecto sobre el que se pueden aplicar fenómenos físicos, estocásticos y lógicos. Esto permite un sustancial ahorro en los costes de desarrollo y prototipado, pues muchos de los procesos pueden ser simulados antes incluso de su diseño físico, evitando la necesidad de llevar a cabo pruebas físicas. La potencia computacional actual hace posible que un ordenador realice múltiples ensayos de simulación sobre un mismo modelo, que, de tener que ser realizados físicamente o calculados matemáticamente tardarían mucho más tiempo en completarse. Además, la simulación va orientada normalmente hacia la optimización, en la que se realizan múltiples ensayos de simulación sobre un mismo modelo cambiando tan sólo una de las variables permitiendo seleccionar el que arroja unos resultados óptimos.

1.1. Motivación

El concepto del aerotaxi (y, en general, del coche volador) no es ninguna novedad, lleva instaurado en la ciencia ficción durante años y forma parte del paradigma de civilización futura que todos hemos visualizado alguna vez. La idea de sortear las limitaciones cartográficas por aire para particulares supone un giro de ciento ochenta grados en los principios del transporte convencional, donde los vehículos están confinados a unas rutas predefinidas por las carreteras y calles existentes y la regulación del tráfico se realiza in situ por semáforos, señales y agentes.

En el modelo de transporte privado actual, el control reside en los conductores, quienes son los encargados de respetar la señalización y de los cuales se espera una implicación total que agregada conduce a un autocontrol del propio sistema. La conducción autónoma, sin embargo, lleva años evolucionando con una notable celeridad y se encuentra hoy en día en un estado de desarrollo altamente avanzado, habiéndose realizado ya incluso pruebas de vehículos autónomos con pasajeros y en la vía pública. No obstante, las carreteras siguen llenas de vehículos pilotados por personas y susceptibles a errores humanos o a factores como la fatiga o la exposición a medicamentos y sustancias estupefacientes, y es por ello que la seguridad de un vehículo autónomo siempre estará sujeta al grado de adhesión al recto comportamiento y a la normativa de las entidades en su entorno (otros vehículos, peatones, etc.) *

Los avances en tecnología aeroespacial, así como las modernas técnicas de telecomunicaciones nos acercan cada vez más este concepto del aerotaxi, en el que varias empresas se encuentran trabajando en fases ya muy avanzadas¹. El taxi parece el sector adecuado para comenzar a implementar la idea de coche volador, pues los trayectos en taxi suelen ser cortos (entre 5 y 50 km de media) y para trayectos largos existe ya una infraestructura de vuelos comerciales altamente implementada en el mundo, por lo que

¹ El proyecto Uber Elevate está programado para ser lanzado en el año 2023 (Uber, 2020), mientras que Lilium planea incorporar su modelo Jet al tráfico aéreo en el año 2025 (Lilium, 2020). Ambos proyectos ya han completado satisfactoriamente múltiples ensayos de vuelo.

carecería de sentido en la actualidad reemplazar a los aviones, que es un modelo de negocio rentable, por aerotaxis.

1.2. Objetivos del Proyecto

Este Proyecto tiene por objetivo principal el desarrollo de un modelo de simulación lo más verosímil posible que sea capaz de replicar el comportamiento de lo que ocurre en una hipotética estación de aerotaxis. Se apoyará para ello en la simulación operacional, y más en concreto en tres metodologías de simulación diferentes, a saber, simulación de eventos discretos (DES), simulación de sistemas dinámicos (SD) y simulación basada en agentes (ABS).

El objetivo secundario e indirecto del proyecto consiste en utilizar el modelo desarrollado para realizar un estudio del rendimiento de la estación sujeto a variaciones en diversos parámetros. Esto tiene a su vez por objetivo implícito la obtención de unos parámetros de diseño (en adelante variables de decisión) que optimicen el comportamiento de la estación con respecto a unos indicadores previamente definidos.

De esta manera, se pretende que los parámetros obtenidos puedan ser utilizados por un equipo de diseño de estaciones de aerotaxi para poder tener una mayor visibilidad previa de la logística que se llevará a cabo en su interior, pudiendo de este modo anticipar decisiones de diseño que podrían tener que ser tomadas de antemano, como puede ser el número de pistas de despegue/ aterrizaje (en adelante, helipuertos) a instalar, el número de personas que transitarán por la estación o el tamaño que debe tener el almacén donde se guardan y recargan las baterías, pues cada aerotaxi debe cambiar de batería entre viajes ya que parar a recargar resulta demasiado costoso e ineficiente (el vehículo tendría que detenerse en un helipuerto, dejándolo inoperativo y además quedando el primero fuera de la circulación durante el tiempo de recarga).

Además, se desea rediseñar el modelo una vez hallados los valores óptimos de las variables de decisión para, posteriormente, ejecutar de nuevo la simulación (esta vez con el nuevo diseño) y lograr obtener datos que puedan ser útiles en el ámbito de la dirección de proyectos.

Se definen tres metas; viabilidad técnica, calidad y coste, que recibirán el nombre de Objetivos de Modelado. *El Proyecto se enfocará, por tanto, desde la perspectiva del

director o manager de proyectos, que es la figura encargada de entregar un proyecto maximizando los tres objetivos de modelado anteriormente mencionados. *

OBJETIVO 1: VIABILIDAD TÉCNICA

El primer paso antes de poder determinar cómo ofrecer un buen servicio es asegurarse de que la estación ha sido correctamente diseñada. Se plantean al efecto las siguientes dos preguntas:

¿Cuántos helipuertos debe tener una estación de aerotaxis?

¿Cuántas baterías debe tener para poder ofrecer un servicio ininterrumpido?

Se debe crear un modelo que, en primer lugar, responda a estas dos preguntas. Se han escogido, por tanto, dos variables de decisión, a saber, d_p (número de helipuertos necesarios) y d_b (número de baterías necesarias) cuya obtención debe ser el objetivo primero a tener en cuenta a la hora de realizar el modelo.

OBJETIVO 2: CALIDAD

En segundo lugar, el modelo debe ser capaz de responder a la siguiente pregunta:

¿Cuál es la calidad del servicio ofrecido por el diseño seleccionado?

La calidad del servicio se define de dos maneras. En primer lugar, midiendo la calidad ofrecida a viajeros en el interior de la estación que quieren coger un aerotaxi. En segundo lugar, midiendo la calidad ofrecida a aquellos viajeros que llegan en aerotaxi a la estación. En el primer caso, se define la calidad mediante el indicador K_{QT} (por las siglas en inglés, Quality to Travellers). Este indicador debe expresar la calidad del servicio ofrecido a los viajeros, que en el sector de transportes depende casi exclusivamente del tiempo de servicio. El indicador ha sido construido de la siguiente manera:

$$K_{QT} = \frac{\bar{T}_{Viajeros}}{Tv_{ideal}} \quad [1.3.]$$

Donde $\bar{T}_{Viajero}$ es el tiempo medio de espera de un viajero en la estación (esto es, esperando a que llegue su turno para poder montarse en el aerotaxi) y Tv_{ideal} representa un tiempo medio razonable decidido con anterioridad a la elaboración del proyecto para la espera de viajeros en la estación. En este caso se ha decidido que un tiempo medio de espera razonable es de $Tv_{ideal} = 2$ minutos.

En segundo lugar, de manera homóloga se define el indicador K_{QA} (Quality to Airtaxis), que se construye como se muestra a continuación:

$$K_{QA} = \frac{\bar{T}_{Aerotaxis}}{Ta_{ideal}} \quad [1.3.]$$

En este caso, el indicador compara el tiempo medio de espera de los aerotaxis (esto es, sobrevolando la estación, a la espera de recibir permiso para aterrizar) con un nuevo tiempo ideal de calidad definido con antelación. En este caso $Ta_{ideal} = 1$ minuto. Se ha decidido un tiempo aceptable menor para el caso de los aerotaxis ya que también se debe perseguir no saturar el espacio aéreo de la estación con aerotaxis a la espera de pista.

La lógica detrás de ambos indicadores es sencilla. Para ambos, si el valor es igual a uno, el funcionamiento de la estación se considera el estándar definido como “de calidad”. En caso de arrojar valores distintos de uno, el resultado multiplicado por cien resultará en el porcentaje de mejora (en caso de un valor mayor) o empeoramiento (si el valor es menor a uno) de la calidad.

OBJETIVO 3: COSTE

Por último, el modelo debe responder también a la pregunta:

¿Cuánto cuesta operar la estación diseñada?

El coste está ligado de manera natural a la ingeniería de proyectos, y muchas concesiones y asignaciones de proyectos se basan casi en su totalidad en la selección de la oferta presupuestaria más económica. Un modelo capaz de predecir el coste aproximado de un proyecto resultará ventajoso a la hora de poder ajustar las ofertas para elaborar propuestas más competitivas.

Se define C_D como el coste diario de operación de la estación, incluyendo gastos de consumo eléctrico (la mayor parte del cual se empleará en la recarga de baterías), personal, consumibles y mantenimiento. El modelo debe incorporar, por tanto, un mecanismo para poder obtener este valor.

Habiendo definido estos objetivos, se pasa a describir las técnicas y tecnologías empleadas en el Proyecto.

2. Descripción de las Tecnologías

2.1. Simulación

Meadows define un sistema como una agrupación de elementos interconectados entre sí, que, en su conjunto, son capaces de generar un comportamiento diferente al de la suma de las partes individuales².

La simulación consiste en la aplicación de una serie de técnicas con fundamento matemático-lógico capaces de representar el funcionamiento teórico de un sistema o proceso. Este proceso puede ser determinístico (se obtiene siempre el mismo resultado para los mismos parámetros de entrada) o estocástico (se obtienen resultados dispares al estar el proceso sujeto a fenómenos de aleatoriedad o probabilidad). Existen numerosas técnicas de simulación, cada una de las cuales es más o menos apta para un determinado proceso en función de la complejidad del mismo, del objetivo perseguido y de la propia naturaleza del sistema.

De esta manera, se puede considerar como simulación desde una simple función matemática que represente, por ejemplo, un movimiento rectilíneo simple, hasta los complejos simuladores virtuales de las agencias espaciales para entrenar astronautas, pasando por la simulación de los posibles resultados obtenidos al lanzar un dado (proceso estocástico) o los modelos meteorológicos empleados para anticipar el clima. La simulación se antoja esencial en el diseño de sistemas y procesos modernos, pues permite al diseñador anticiparse a los resultados esperados sin necesidad de probarlos empíricamente, lo que otorga una ventaja a la hora de tomar decisiones previas al desarrollo.

² Meadows (2008)

2.2. Simulación Operacional frente a Simulación Matemática

Tradicionalmente la simulación del comportamiento de sistemas complejos se ha basado en modelos agregados matemáticos. Esto es, modelos que emplean variables y funciones matemáticas multidimensionales. Existen metodologías de simulación agregada para tratar problemas de naturaleza tanto continua como discreta.

En la simulación matemática, se definen una serie de condiciones, variables (cambian con el tiempo) y parámetros (fijos), así como unas restricciones y una función o funciones objetivo que dependen de esas variables y parámetros. De esta manera, se pueden obtener dos resultados. El primero es el valor de la función objetivo sujeto a un determinado conjunto de parámetros. El segundo es el valor de esos parámetros cuando se pretende optimizar el valor de la función objetivo (optimización; minimización y maximización).

Existen también métodos matemáticos capaces de incorporar fenómenos estocásticos y probabilísticos. Es el caso de la teoría de colas, que se emplea en la simulación de fenómenos de naturaleza discreta en los que existen una serie de recursos limitados, o la teoría de juegos, cuyo objetivo es determinar la probabilidad de todos los posibles resultados de un proceso sujeto a decisiones tomadas por los diferentes agentes implicados.

La simulación operacional, sin embargo, consiste en la ejecución de un modelo computarizado que imita el comportamiento de un sistema o proceso real y complejo, a lo largo del tiempo y desde un determinado punto de vista.

Un modelo es una representación virtual de un sistema real basada en información conocida. Un buen modelo debe ser capaz de captar las características del sistema real, tales como los eventos que tienen lugar en él, los factores externos que puedan afectar al sistema o verse afectados por el mismo y las interacciones entre elementos. Además, debe estar construido de manera que aporte información de valor para poder alcanzar los objetivos propuestos. Para todo ello es de vital importancia la selección de la correcta

estrategia de simulación, pues un proceso puede ser fácilmente modelable, fiable y preciso empleando una cierta estrategia y muy difícil o prácticamente imposible de modelar si se emplea la estrategia errónea.

Actualmente existen diversas estrategias de modelado de sistemas para simulación. Este proyecto se centrará en las tres principales (cada una de las cuales presenta unas determinadas ventajas y desventajas), estudiándolas, comparándolas y eligiendo la estrategia adecuada para cada elemento o sub-sistema. Las estrategias de simulación que se emplearán son las siguientes:

*2.2.1. Simulación de Eventos Discretos (Discrete Event Simulation o **DES**)*

Este tipo de simulación se utiliza, como resulta natural, cuando se producen en el sistema eventos discretos, es decir, eventos en los que se modifica el valor de una variable discreta en función de una serie de condiciones. Este tipo de simulación resulta muy útil, pues es capaz de incorporar estocasticidad al sistema haciendo uso de distribuciones de probabilidad discreta conocidas para modelar variables cuyo valor es aleatorio. En la simulación de eventos discretos se definen entidades que recorren el sistema y procesos que modifican los atributos de esas entidades empleando para ello una serie de recursos. Un ejemplo de sistema fácilmente modelable utilizando este tipo de simulación es un centro de servicio de atención telefónica, en el que se reciben una serie de llamadas (entidades discretas, no tiene sentido hablar de media llamada) en ciertos momentos (aleatorios) que deben ser atendidas (procesadas) por uno o varios operadores (recursos). Se puede dar el caso de que en cierto momento no haya operadores necesarios para atender a todas las llamadas que han llegado al sistema, con lo que algunas deben dejarse en espera (en cola). La simulación de eventos discretos es, por tanto, una alternativa a la teoría de colas que también se utiliza para estudiar eventos discretos y que, además, permite incorporar estocasticidad ya que los valores de las variables cambian entre replicaciones de la simulación.

2.2.2. Simulación de Sistemas Dinámicos (*System Dynamics* o **SD**)

En un sistema dinámico existe un número infinito de estados posibles, ya que sus variables evolucionan de manera continua al contrario de lo que sucede en los sistemas discretos. La simulación de sistemas dinámicos está concebida para sistemas en los que existe alto grado de complejidad en sus relaciones entre variables, existiendo fuertes interdependencias entre las mismas³. Estas variables evolucionan de manera continua (e.g. temperatura, cantidad de producto, ingresos) en el tiempo. En la simulación de sistemas dinámicos se modelan las variables como *stocks* (depósitos o saldos) y sus derivadas como *flows* (flujos). Habitualmente se conoce el valor de las derivadas pero no de las variables ya que éste va cambiando en el tiempo. La simulación de sistemas dinámicos es, por tanto, la apropiada para modelar sistemas regidos por ecuaciones diferenciales.

2.2.3. Simulación Basada en Agentes (*Agent-Based Simulation* o **ABS**)

Se trata, estrictamente hablando, de un subtipo dentro de simulación de eventos discretos, sin embargo, emplea para modelar una lógica completamente distinta y propia que en lugar de centrarse en los procesos se centra en los actores o agentes del sistema, definiendo sus movimientos, su comportamiento ante eventos y sus interacciones con otros agentes. Una vez se ha definido el comportamiento de cada agente, éste puede ser instanciado cuantas veces se desee. Cuando se habla de simulación basada en agentes se utiliza el concepto *bottom-up* (de abajo a arriba, contrapuesto al *top-down* que emplean la simulación de eventos discretos clásica y los sistemas dinámicos), pues en lugar de definirse el comportamiento del sistema y sus variables tan sólo se define el comportamiento de los agentes y son éstos los que, una vez arrancada la simulación, se “sueltan” en el sistema, reordenándose y actuando conforme a su definición y otorgando un comportamiento propio al sistema que no estaba definido explícitamente.

³ Andrés et al. (2016)

2.3. Elección de la Herramienta de Simulación

A la hora de seleccionar la herramienta en la que desarrollar el modelo, se ha tenido en cuenta fundamentalmente la facilidad de desarrollo del mismo. Se ha optado por Anylogic debido a que es un programa completamente enfocado a la simulación de procesos empleando las tres estrategias anteriormente mencionadas (DES, SD, ABS).

La interfaz de la herramienta es gráfica, hasta el punto en que, para modelos muy sencillos, no requiere de conocimientos de programación. Anylogic es, además, una herramienta basada en Java por lo que, si se comprenden los principios de la programación orientada a objetos, y se tiene una cierta noción del lenguaje es posible añadir al modelo una gran variedad de funciones.

Se han barajado también otras herramientas como Matlab o Simulink. Se han descartado, sin embargo, por estar más enfocadas en la simulación de fenómenos matemáticos y físicos que requieren de funciones que realicen cálculos extremadamente complejos. Además, la interfaz de Simulink resulta mucho menos amigable con el usuario a la hora de modelar procesos de naturaleza discreta, mientras que la de Matlab hace uso exclusivo de la entrada de código y no es gráfica.

Anylogic basa todo su funcionamiento en la simulación basada en agentes. De esta manera, considera que cualquier elemento embebido en el sistema es un agente. Esto incluye, lógicamente, a los agentes que se vayan a incluir en el modelo, pero también, por ejemplo, a cualquier entidad que discurre dentro de un flujo de eventos discretos. Se diferencia, de esta manera, de otros software de simulación como Arena, que trabaja exclusivamente bajo el paradigma de la simulación de eventos discretos y cuyos diagramas de flujo son atravesados por entidades (estas poseen atributos, variables y parámetros pero no poseen estados ni pueden ser instanciados por lo que no son agentes).

Del mismo modo, Anylogic también considera como agente a cualquier otro elemento del sistema nativo con características y funciones propias, como puede ser, por ejemplo, un bloque de proceso dentro de un flujo de eventos discretos o, incluso, el propio diagrama de flujo de eventos discretos. En resumen, cualquier entidad modelada en

Anylogic que tenga unas características y funcionamiento propio nativo es considerada como un agente.

Resultará necesario, por tanto, durante la descripción del modelo, realizar una distinción entre cuándo se habla de un agente diseñado por nosotros y cuándo se emplea el término agente para hacer referencia a un agente nativo de Anylogic. De ahora en adelante se empleará el término “Agente del Modelo” para referirse a aquellos agentes modelados y descritos por nosotros, mientras que se empleará la palabra “agente” cuando se quiera hacer referencia al carácter de agente de otras entidades soportadas por Anylogic.

3. Antecedentes Históricos y Estado de la Cuestión

En este capítulo se pretende situar el proyecto en un contexto histórico-tecnológico que permita familiarizarse con los hitos más relevantes en lo que respecta al todavía inexistente sector del aerotaxi, haciendo énfasis a continuación en los trabajos y publicaciones que abordan la simulación operativa de redes de aerotaxi o bien de redes de transporte que comparten una o varias características con las mismas. Se busca ofrecer, por tanto, un marco transicional desde diferentes puntos de vista que deben converger en la visión del proyecto y aportar un énfasis histórico a la motivación.

En primer lugar se realiza un repaso temporal de los avances que han permitido situar en el mapa el concepto de aerotaxi tal y como se entiende en la actualidad. Para ello se repasa primero la historia del sector del taxi, cuya evolución trae de la mano la posibilidad de una apertura al espacio aéreo. Se menciona la introducción de las herramientas más importantes plenamente asentadas como son el control de operaciones centralizado o los taxímetros, así como las últimas disrupciones tecnológicas llamadas a cambiar el negocio y los actores y empresas que se hallan detrás de las mismas. De esta manera, se persigue presentar el estado de desarrollo actual que resulta de la convergencia de todos estos avances en sectores distintos como son el transporte privado, la conducción autónoma, la aviación y las comunicaciones.

A continuación, se detallan los conceptos de vehículos aéreos proyectados para funcionar como aerotaxis que se encuentran en un estado de desarrollo más avanzado, dando así una idea de las especificaciones técnicas que tendría la hipotética red de vehículos que se persigue simular.

Por último, se comentan los trabajos similares que existen publicados en torno a las dos principales casuísticas (aerotaxis y simulación) y que comparten una o varias características con este proyecto.

Se pretende con todo ello ofrecer una visión multi-perspectiva que resalte el carácter de innovación del proyecto.

3.1. Del Taxi al Aerotaxi: Un nuevo paradigma

El primer uso de carruajes para transporte de pasajeros data de 1555 en Londres. Si bien es cierto que estos vehículos llevaban varios siglos utilizándose, hasta esta fecha, debido principalmente al estado de las carreteras, únicamente se empleaban en el transporte de mercancías. Los primeros indicios del uso del transporte privado como negocio se remontan al s. XVII (entre 1625 y 1636) en las ciudades de París y Londres, donde conductores de carruajes (los conocidos como *Hackney Carriages*) comenzaron a ofrecer servicios de transporte a particulares a cambio de dinero. Surgen también las primeras estaciones de taxis (carruajes en fila en un mismo lugar para dar cobertura a una demanda). Este concepto fue rápidamente acogido por la mayor parte del público de todas las esferas sociales⁴. Con la aparición de los primeros vehículos a motor surgen en 1897 en Londres los primeros conductores de taxi moderno. Éstos empleaban los vehículos *Hummingbird*, diseñados por Walter Bersey y que, en contra de lo que se puede creer, utilizaban un motor eléctrico. Posteriormente y en el mismo año, el concepto fue adaptado por la ciudad de Nueva York para acto seguido ser replicado en las ciudades más importantes del mundo. Cabe destacar el caso de Stuttgart, que implantó a finales de año el primer taxi impulsado por gasolina y que, además, incorporó los primeros taxímetros. A partir de este momento, comienza una extensión del negocio del taxi por todo el mundo durante la primera mitad del s. XIX., que prospera aún más tras dos significativas disrupciones tecnológicas. En 1940 se incorpora por primera vez la comunicación por radio, lo que permite crear las primeras oficinas de despacho de taxis y, ya en la década de 1980, el despacho pasa a realizarse por medio de ordenadores, dando lugar al estereotipo de taxi que se conoce en la actualidad.⁵

Tradicionalmente, los taxis modernos han funcionado bajo tres modalidades de servicio, a saber, despacho, parada y búsqueda. En la primera modalidad, y la más utilizada, los conductores son asignados por el centro de operación a los pasajeros tras realizar éstos últimos una solicitud (tradicionalmente una llamada). En la modalidad de parada, los taxis esperan en un punto establecido al efecto la llegada de pasajeros,

⁴ Gilbey (1903)

⁵ Hurley (2012)

siguiendo un sistema de asignación FIFO (First-In, First-Out). Por último, la modalidad de búsqueda es casi exclusiva de las grandes ciudades en las que existe una demanda suficiente como para que los taxis recorran las calles en busca de clientes.⁶

Los avances en tecnologías como el Cloud Computing o el IoT han traído consigo las bases de un nuevo paradigma de transporte privado digitalizado, en el que los conductores son constantemente monitorizados en tiempo real en la nube y los clientes pueden pedir un taxi desde cualquier dispositivo conectado a internet. Las rutas y asignaciones de vehículos a clientes son establecidas previo trayecto por el centro de control (que en este caso es un software en tiempo real que es capaz de decidir en segundos las asignaciones y rutas óptimas a realizar, así como informar al pasajero de antemano de la identidad del conductor asignado, y viceversa, los datos de su vehículo, e incluso el precio estimado del trayecto). Este revolucionario concepto ha recibido una generosa acogida por parte del público (ya que da lugar a un servicio más económico y de una mayor calidad y comfort) y, al igual que la mayor parte de disrupciones tecnológicas modernas, no surge como resultado de la modernización de las compañías de taxi ya existentes, sino que han sido start-ups (ninguna de las cuales supera en la actualidad los 12 años de edad) las encargadas de irrumpir en el mercado con este nuevo modelo. Empresas como Uber (EEUU), Didi Chuxing (China), Yandex (Rusia) Cabify (España) o Lyft (EEUU) han logrado en pocos años hacerse con una importante cuota del mercado del transporte privado.



Figura 1: i: Hackney Carriage (Gilbey, 1903). ii: Taxi de Londres 1905-act. (Hurley, 2012) iii: Taxi autónomo diseñado por Uber y Tesla. (Uber, 2020)

⁶ Salanova, et al. (2013)

Como resulta natural, esto ha suscitado una completa agitación del sector, desentrañando una batalla entre el sector del taxi tradicional y el nuevo servicio, que es visto como una completa amenaza. Además, en varios países estas empresas permiten a particulares ejercer de conductores, lo cual supone una ventaja competitiva aún mayor que en los países donde la actividad está más regulada (en los cuales, por lo general, el conductor ha de tener una licencia profesional, así como una licencia para utilizar el vehículo como VTC). Las respuestas de los diversos gremios de taxistas tradicionales han dado lugar a protestas y actos violentos reivindicativos de una igualdad competitiva en todos los países en los que se ha implantado el negocio. El taxi tradicional también se ha visto obligado a evolucionar para ofrecer servicios similares a los que ofrecen estas empresas.

De esta manera, el negocio del transporte privado se ha visto convertido en una suerte de carrera por ofrecer el mejor y más detallado servicio posible, potenciando la innovación y la eficacia que el sector llevaba años descuidando. De cualquier manera, la figura del conductor sigue siendo clave y el actuador principal del sistema sigue siendo un ser humano. Esto, sin embargo, podría dejar de ser así en la próxima década. La introducción y rápida evolución de tecnologías como la IA o el Machine Learning han dado como resultado el desarrollo de los primeros vehículos autónomos no-tripulados (Unmanned Vehicles o UVs) para pasajeros, que ya se encuentran en pruebas en algunas carreteras del mundo, y cuya implantación para ofrecer servicios de taxi ya está proyectada por empresas como Uber o Yandex. Así mismo, los avances en el sector aeronáutico han replicado esta evolución con la introducción de los UAV (Unmanned Air Vehicle) autónomos. Esta tecnología lleva años siendo utilizada en el terreno militar, sin embargo, ya se están dando los primeros pasos hacia su introducción comercial.⁷

Además, gracias a la mejora de la capacidad y velocidad de cálculo de los procesadores modernos, han sido posibles avances en tecnologías de control y estabilización automáticas que han impulsado el uso de drones de estabilización vertical con múltiples hélices, generalmente cuatro (cuadricópteros) y que llevan años

⁷ Buckley (1998)

utilizándose para diversos propósitos como monitorización del tráfico, regadío, rescates en zonas peligrosas y transporte de mercancías a zonas en guerra, así como para el ocio.

Todos estos avances y interrupciones convergen en el surgimiento del vehículo eléctrico de aterrizaje y despegue vertical o eVTOL (electric Vertical Take-Off and Landing), que, por primera vez, presenta una tecnología lo suficientemente segura y eficiente como para ser contemplada para su uso en el transporte de pasajeros, abriendo al fin la posibilidad de la introducción del coche volador en la sociedad.

El primer concepto de eVTOL fue propuesto por Moore en 2010 para la NASA. La agencia ya comenzó a interesarse por en el aerotaxi en 2001 con su programa SATS (Small Aircraft Transportation System), aunque estos aerotaxis eran pequeñas avionetas pilotadas y no eVTOLs, por lo que no se pueden considerar como el primer aerotaxi en el sentido que este trabajo da al término (debe ser capaz de despegar y aterrizar en distintos puntos del área urbana, sin necesidad de pista de aterrizaje o bien empleando una de dimensiones muy reducidas que pueda coexistir con el ecosistema urbano), aunque sí como un precursor. El modelo presentado por Moore (conocido como *Puffin*), sin embargo, sí reúne todas las características, pues se trata de un modelo eléctrico capaz de realizar aterrizajes y despegues verticales. A pesar de ser concebido tan sólo un prototipo conceptual, el Puffin cumplió con su deber de sentar las bases para el diseño de aerotaxis modernos (vehículo eléctrico de cero emisiones con capacidad de despegar y aterrizar en espacios limitados).⁸



Figura 2: Recreaciones virtuales del funcionamiento del NASA Puffin. (NASA, 2010)

⁸ Moore (2010)

3.2. El Aerotaxi: Tecnología

A pesar del elevado número de limitaciones que aún existen hasta el uso comercial de estos vehículos, principalmente técnicas y regulatorias⁹, existen numerosas compañías que ya disponen de un prototipo operativo, ya sea de tipo dron o de tipo avión ligero. La tabla 1 repasa los 8 prototipos considerados más esperanzadores, por orden de mayor a menor estado de desarrollo (en éste caso se ha utilizado un criterio propio para el estado de desarrollo basado en el número de menciones a cada prototipo en el portal especializado *eVTOL news*).

Modelo	Max. t. vuelo	Distancia de vuelo	Potencia	Peso trans-portable	Peso	Velocidad de Crucero	Configuración	T en recorrer 30km	Autónomo
Uber Elevate	15 min	100 km	N/A	400 kg	N/A	241 km/h	Alas + Hélices	7,5 min	SÍ
Airbus Vahana A3	15 min	100 km	360 kW	200 kg	695 kg	230 km/h	Alas + Hélices	N/A	SÍ
Lilium Jet	48 min	300 km	186 kW	500 kg	490 kg	252 km/h	Alas + Hélices	8,2 min	SÍ
eHang 184	25 min	30 km	152 kW	100 kg	260 kg	100 km/h	Hélices	18,7 min	SÍ
Joby S4	15 min	241 km	N/A	N/A	1815 kg	322 km/h	Alas + Hélices	N/A	NO
Vertical Aerospace	N/A	160 km	N/A	250 kg	730 kg	80 km/h	Hélices	N/A	NO (remoto)
Elroy	35 min	N/A	N/A	120 kg	240 kg	70 km/h	Hélices	N/A	SÍ
Volocity	30 min	35 km	70 kW	200 kg	700 kg	110 km/h	Hélices	N/A	SÍ
eHang 216	21 min	35 km	304 kW	220 kg	360 kg	130 km/h	Hélices	N/A	SÍ
Kitty Hawk Cora	16,5 min	100 km	228 kW	181 kg	1224 kg	180 km/h	Alas + Hélices	10,9 min	SÍ

Tabla 1: Comparativa de prototipos de potenciales aerotaxis existentes. Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes (Bacchini & Cestino, 2019) (Volocopter, 2020) (Lilium gmbh, 2020) (eVTOLnews, 2019)

⁹ Pring-Mill (2018)

La mayoría de prototipos se basan en la tecnología de despegue y aterrizaje vertical eléctrico o eVTOL. El vehículo opera gracias a motores individualmente controlables y orientables en el espacio que permiten que se mantenga en equilibrio en el aire gracias a una tecnología de estabilización¹⁰. Esta tecnología permite una operabilidad y maniobrabilidad mucho mayor que el despegue horizontal por lo que resulta idónea para este tipo de servicio, pues permite compactar mucho el espacio que ocupan las estaciones y es mucho más controlable por la IA de a bordo. El uso de motores individuales orientables, sin embargo, disminuye mucho la potencia disponible para movimiento horizontal o de crucero. En este punto entra en juego la aerodinámica del vehículo. Los modelos eVTOL que además presentan alas disponen de una ventaja frente a los que se sustentan tan sólo por medio de hélices (Tabla 1)., pues alcanzan velocidades mucho mayores ya que al orientar los ejes de sus motores en la dirección de vuelo las propias alas proporcionan el empuje (o *lift*, en términos de aerodinámica) por lo que la totalidad de la potencia se puede emplear en el movimiento horizontal.



Figura 3: i: Volo-City ii: Lilium Jet iii: e-Hang 184 (eVTOLnews, 2019)

La mayoría de UAV tradicionales utiliza radiofrecuencia para el control centralizado, lo cual aumenta el rango operacional y es útil, por ejemplo, en situaciones militares. Mahmoud, et al. (2015) presenta una integración del modelo con el Cloud Computing, donde los vehículos están conectados a la nube por conexión a internet.¹¹. Esta integración da cabida a unas mayores sinergias con el ámbito de negocio, permitiendo a la empresa que opera la red incorporar en su base de datos toda la información de los viajes realizados en tiempo real para así operar con ella. Del mismo modo, permite al vehículo autónomo estar conectado en todo momento, lo cual le otorga la capacidad de incorporar información de casuísticas más diversas en sus decisiones, así

¹⁰ Farid, et al. (2017)

¹¹ Mahmoud, et al. (2015)

como establecer una conexión globalizada entre vehículos que permiten a la IA de control aprender de una manera más eficaz (pues la mayoría de algoritmos de conducción autónoma se basan en técnicas de Machine Learning en la nube).

3.3. El Aerotaxi: Estudios Previos

La tecnología a la que en este proyecto se hace referencia, así como el concepto de aerotaxi como tal, se encuentran aún en fases muy tempranas de desarrollo e implementación, es por ello que existe un número muy limitado de publicaciones científicas a las que hacer referencia y las que existen abordan temáticas que convergen en determinados aspectos, pero que no terminan de tratar el mismo tema (las redes de aerotaxis comerciales) . Existen, sin embargo, trabajos como el de Laura Plaza que sí tratan sobre redes de aerotaxis comerciales¹². Para muchos aspectos que se desarrollarán a lo largo del proyecto, el trabajo se apoyará a menudo en publicaciones en ámbitos tecnológicos similares más implementados y que puedan compartir una o varias características con el aerotaxi, como pueden ser el transporte de paquetes con drones o los taxis autónomos.

Mohammed, et al. (2014) recopila las aplicaciones de los UAV en territorios urbanos¹³ y Pérez-Montenegro, et al. (2018) propone un modelo para un centro de coordinación de UAVs aunque hace énfasis en misiones de inspección, monitoreo, rescate y transporte de paquetes y no de transporte de pasajeros.¹⁴



Figura 4: i: eHang 216 ii: Uber eCRM 001 iii: Airbus Vahana A3. (eVTOLnews, 2019)

Además, trabajos como el meta análisis realizado por Kellerman, et al. (2020), que recoge las publicaciones más relevantes sobre el uso de drones para transporte de pasajeros y paquetes resultan útiles para obtener información contrastada sobre los

¹² Plaza (2019)

¹³ Mohammed, et al. (2014)

¹⁴ Perez-Montenegro, et al. (2018)

diversas casuísticas que aborda el trabajo (e.g. legislaciones y regulaciones, seguridad, uso energético, etc.)¹⁵

Por último, merece especial mención el trabajo de Pradeep (2019) que presenta una investigación a fondo de un sistema de gestión de llegadas de aerotaxis para un ecosistema de movilidad urbana bajo demanda. En él se recogen en detalle numerosos aspectos relevantes a éste trabajo como el despegue y aterrizaje de los vehículos (realizándose una descripción muy completa de la secuencia completa), la asignación de vehículos a pasajeros o la asignación y cálculo de rutas a vehículos. También se realizan numerosos experimentos de simulación y optimización, aunque estos tienen que ver con la física detrás de las maniobras del vehículo y no con la simulación operacional del sistema de estaciones o de la red de transporte.¹⁶

¹⁵ Kellerman, et al. (2020)

¹⁶ Pradeep (2019)

3.4. El Aerotaxi y la Simulación: Estudios Previos

Existen publicados varios estudios sobre transporte urbano que incorporan modelos de simulación. Los primeros modelos avanzados de redes de taxis fueron desarrollados por Yang et al. aunque se trataba de modelos agregados matemáticos y no de modelos de simulación operacional. Los mismos fueron mejorando sus modelos hasta llegar a incorporar factores como la congestión en carreteras y calles¹⁷. En lo que a simulación operacional se refiere, y más en concreto a las técnicas de simulación que se van a utilizar en este trabajo (a saber, eventos discretos, sistemas dinámicos y simulación basada en agentes) es necesario mencionar el trabajo de Kikuchi, et al. (2002), que diseña el primer modelo basado en agentes para uso en transporte¹⁸. Destaca también el estudio desarrollado por Salanova et al., quienes proponen un modelo basado en agentes para una red urbana de taxis terrestres. La ventaja de un modelo basado en agentes es que permite que cada taxi adquiera un comportamiento individual único, pues responde ante estímulos al agente y no al sistema¹⁹.

Salanova, et al. (2018) define un marco sobre el que apoyarse para construir modelos basados en agentes de redes urbanas de taxis. Este trabajo incluye metodologías para la adquisición de datos previa al modelado, así como para la generación de escenarios de simulación²⁰. También destaca la incorporación de modelos GIS o modelos geográficos, con los que se puede emular un entorno geográfico donde llevar a cabo la simulación.

Encontramos también modelos DES de redes de taxi como el de Lioris et al. (2010) que define y modela varios eventos que pueden tener lugar en el entorno del taxi, como pueden ser llegadas de vehículos o pasajeros a una parada, decisiones imprevistas tomadas por pasajeros o incluso situaciones inusuales (por ejemplo, cuando un conductor decide dejar de esperar a un cliente que llega tarde)²¹. Además, en el trabajo de Laura

¹⁷ Yang & Wong. (1998)

¹⁸ Kikuchi, et al. (2002)

¹⁹ Salanova, et al. (2013)

²⁰ Salanova, et al. (2018)

²¹ Lioris, et al. (2010)

Plaza también podemos encontrar un modelo basado en eventos discretos que simula una red de aerotaxis en una gran ciudad como Madrid.²²

El último trabajo destacable encontrado para esta investigación es Schumann, et al. (2011), que propone un modelo híbrido de simulación de las operaciones de UAV civiles cruzando eventos discretos y simulación basada en agentes. A pesar de no hacer mención al concepto de aerotaxi, el modelo incorpora UAVs en un entorno GIS y extrae indicadores importantes como consumo de combustible o autonomía.²³

²² Plaza (2019)

²³ Schumann, et al. (2011)

3.5. Patentes

En lo que a patentes respecta, existen patentes en las tres casuísticas que más incumben al proyecto: vehículos, estaciones y sistemas de gestión de redes. A continuación se repasan las más relevantes.

US20090164260A1: Publicada por Richard Kane y que describe un sistema de gestión logística de aerotaxis. Esta patente fue abandonada en 2012 pero se menciona por ser la única publicada que describe un sistema de estas características.²⁴

WO2019089677A1: Publicada por Peter F. SHANNON en la que se describe una plataforma de gestión de helipuertos en una estación para vehículos eVTOL, similar al que se describe en este trabajo.²⁵

US20190263515A1 : Publicada por KAREM AIRCRAFT Inc. y en la que se describe un vehículo eVTOL de hélices con múltiples rotores de velocidad y ángulo variable. Contiene esquemas de la mayoría de modelos ya mencionados (Lilium, etc.) y ha sido patentado también en Corea del Sur bajo el código **KR20190133799A**.²⁶

WO2020141513A2 : Publicada por Chen Rosen. En ella se describe un vehículo eVTOL impulsado por alas y hélices.²⁷

WO2019210003A1: Publicada por Thomas W. Melcher y en la que también se describe un sistema eVTOL, aunque éste consiste un accesorio para poder transportar por aire vehículos terrestres como un turismo.²⁸

²⁴ Kane (2009)

²⁵ Shannon (2019)

²⁶ Karem (2019)

²⁷ Rosen (2020)

²⁸ Melcher (2019)

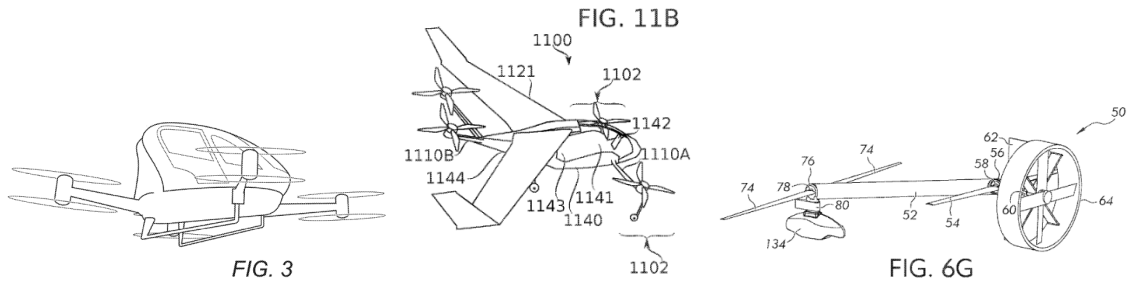


Figura 5: Esquemas de patentes para: i: eVTOL con r6tores de velocidad variable (Karem, 2019). ii: eVTOL con alas y h6lices (Rosen, 2020) iii: Accesorio para veh6culos terrestres. (Melcher, 2019)

3.6. Conclusiones del Cap6tulo 3

El negocio del aerotaxi, pese a encontrarse a6un en un estado de desarrollo previo a su implantaci6n comercial, dispone ya de una gran variedad de medios y tecnolog6as (IA, Machine learning, conducci6n aut6noma, eVTOL) as6 como de diversas y fuertes inversiones de capital y recursos por parte de agentes muy importantes tanto del negocio del transporte privado como del sector de la aviaci6n e incluso del sector p6blico aeroespacial, habi6ndose registrado ya numerosas empresas cuyo 6nico n6cleo de negocio consiste en la implantaci6n de veh6culos a6reos aut6nomos para transporte privado (algunas de las cuales, como es el caso de Lilium disponen ya de prototipos con cientos de horas de vuelo de prueba a sus espaldas). Esta apuesta por el traslado del transporte privado al espacio a6reo implica que su apertura al p6blico se anticipa inminente y se espera para los pr6ximos a6os.

Se ha visto tambi6n c6mo la simulaci6n operacional lleva a6os aplic6ndose en el transporte privado as6 como en el estudio de redes de veh6culos a6reos no tripulados, lo que da a entender que es tambi6n una herramienta adecuada para dar apoyo al dise6o de redes de aerotaxi y cuyo uso podr6a dar numerosos beneficios y acortar los plazos de pruebas y prototipado en futuros proyectos.

A continuaci6n, conocida ya la vanguardia del sector, se proceder6 a la construcci6n de un modelo de simulaci6n de elaboraci6n propia sobre el que una empresa de caracter6sticas similares a las anteriormente mencionadas pueda apoyarse para dar

flujo de realimentación de información al proceso de diseño, recortando con ello el coste del proyecto. Se realizará el modelo atendiendo a las prácticas habituales en la construcción de modelos de simulación como los que se presentan en los trabajos citados, esperando que ello otorgue un mayor rigor científico a la investigación.

4. Definición del Problema

El objetivo principal de éste capítulo reside en comprender correctamente el funcionamiento de una estación de aerotaxis y aplicar ese conocimiento a la construcción de un modelo de simulación fiable y robusto. Al final del capítulo, se debe dar respuesta a las siguientes cinco preguntas:

¿Cuáles son las variables del problema?

¿Cuáles son los parámetros del problema?

¿Cuáles son las variables de decisión del problema?

¿Cuáles son los procesos del problema?

¿Qué estrategia de simulación es la óptima para modelar cada uno de los aspectos del problema?

Se anticipa de extrema necesidad la correcta respuesta a estas preguntas, pues de ello va a depender en gran medida la obtención de un modelo que represente correctamente el problema. Se realizará, además, un modelo conceptual, esto es, un modelo de simulación explicativo y sin un formato específico que, pese a no poder ser ejecutado por ningún software, permitirá comprender la naturaleza de las sucesiones de eventos que dan forma a la realidad del problema.²⁹

La construcción de un modelo conceptual es una práctica recurrente en cualquier trabajo de simulación y su inclusión previo desarrollo de cualquier modelo en software está aconsejada en la gran mayoría de manuales de mejores prácticas en simulación.³⁰

Además, otro factor a tener muy en cuenta es la complejidad del modelo a construir. Un modelo debe ser representativo de la realidad, sin embargo, se debe tener en cuenta el equilibrio entre la complejidad del modelo y la utilidad del mismo. De realizar un modelo demasiado sencillo se puede caer en el error de no representar correctamente el problema. Sin embargo, son cada vez más frecuentes los errores de modelado debido al fenómeno completamente opuesto. Esto es, la creación de modelos

²⁹ Furian et al. (2015) pág. 2

³⁰ Karnon et al. (2012)

demasiado complejos. Esto va en contra de lo predicado por la comunidad de simulación, que siempre apuesta por seleccionar la opción más sencilla de modelado siempre que ésta no sacrifique en una medida elevada el propósito del modelo³¹. Chwif et al. (2000) describe varios factores por los que un modelo pudiera resultar inadecuadamente complejo. Estos factores guardan relación con la naturaleza humana y no con motivos técnicos ni de conocimiento:

-Factor del “Presumido”: Un modelo más complejo tiene el potencial de resultar más atractivo para los gerentes de un proyecto que otro más simplificado, aunque ambos arrojen una información similar. Esto se aplica, sobretodo, en modelos animados en los que se puede querer realizar una animación demasiado detallada, lo cual puede llevar a modelos más lentos y, en ocasiones, inejecutables por un ordenador con capacidad de procesamiento limitada²². Para este trabajo, aunque se aplicarán animaciones (pues uno de los objetivos es mostrar visualmente la estación en funcionamiento a un gerente), se procurará simplificar las mismas al máximo.

-Síndrome del “Todo Incluido”: Se da más en programadores inexpertos que se muestran inseguros de qué incluir en la simulación, lo que les lleva a no hacer simplificaciones ni tomar supuestos que facilitarían mucho el modelado.²²

-Factor de “Posibilidad”: Debido a la creciente potencia de procesamiento de los ordenadores, se puede caer en la práctica de asumir que un modelo moderno debe resultar más complejo ya que la tecnología moderna así lo permite.²²

Para los apartados siguientes, se trabajará teniendo muy en cuenta estos factores para así evitar caer en sobrerrepresentaciones del sistema.

³¹ Chwif et al. (2000) pág. 2

4.1. Descripción y Funcionamiento de la Estación

4.1.1. Descripción de la infraestructura

Se trata de un edificio de dos pisos y planta cuadrada. Dispone de un juego de escaleras mecánicas para comunicar ambos pisos, así como de dos ascensores para facilitar el acceso a personas discapacitadas al piso superior.

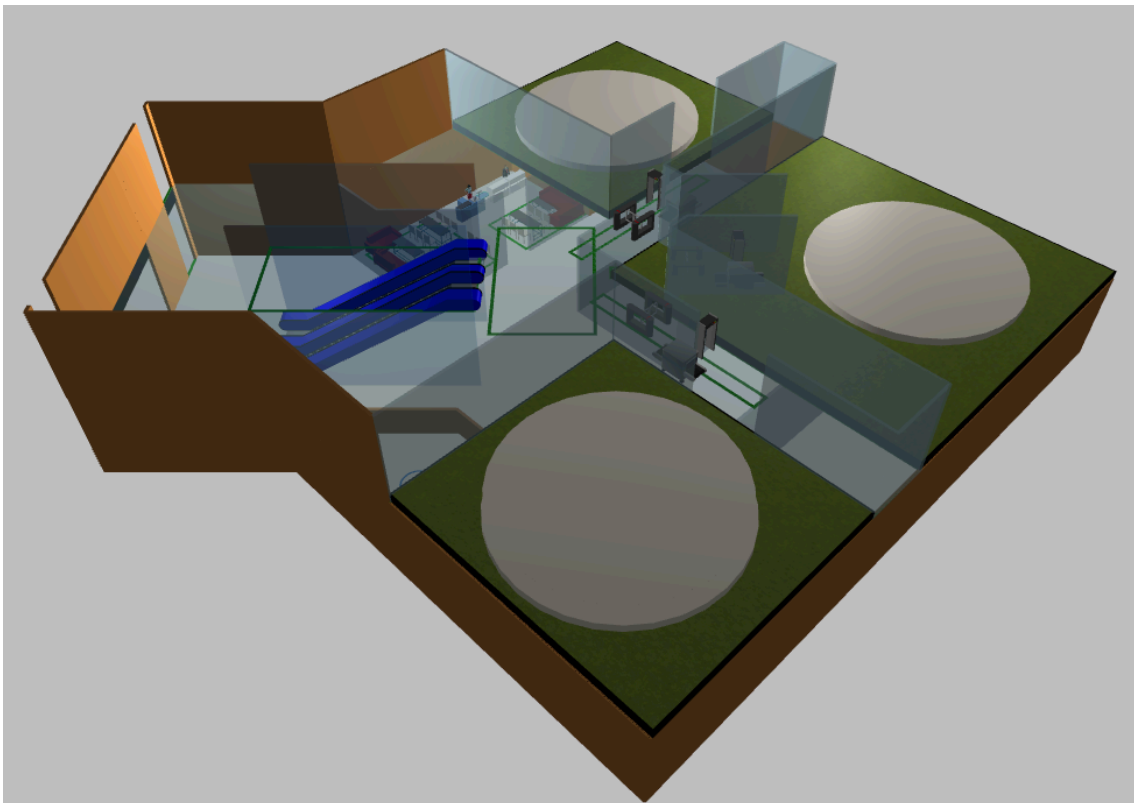


Figura 8: Vista 3D del edificio, se ha suprimido el tejado y han aplicado transparencias a algunos elementos para facilitar la comprensión del espacio. Fuente: Elaboración propia en Anylogic

En el piso superior se hallan las tres pistas de despegue/ aterrizaje. Cada pista dispone de su propio pasillo de acceso. A pesar de disponer de tres pistas, se estudiará la posibilidad de ampliar o reducir este número en función de las necesidades derivadas de los resultados de la simulación. La instalación de gestión de recambios y recarga de las baterías, a pesar de estar integrada con la estación, no se muestra físicamente, aunque sí hay un almacén habilitado al efecto para albergar baterías en la planta baja. Sin embargo, sí será posible acceder al número de baterías cargadas/ descargadas en todo momento.

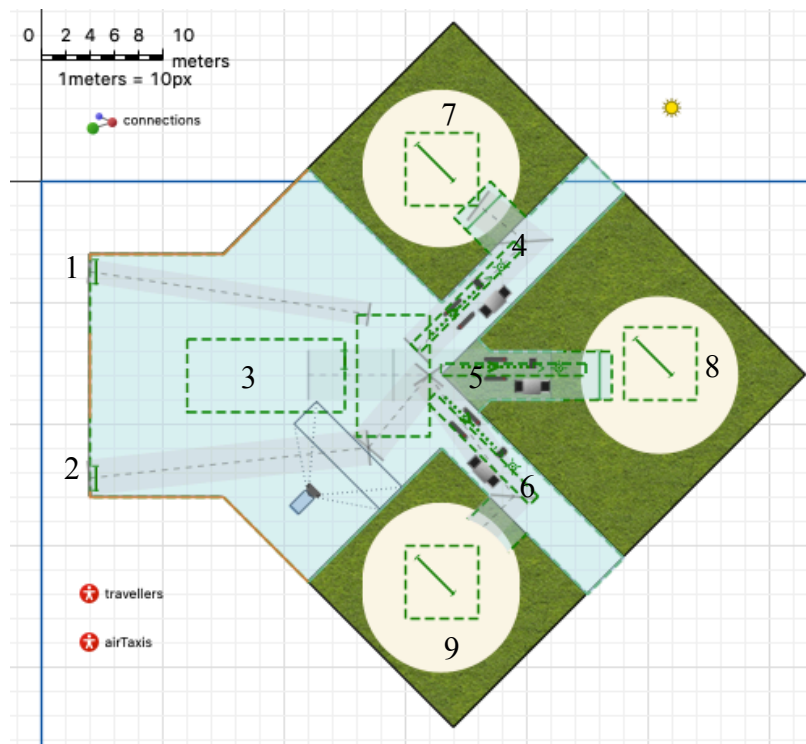


Figura 9: Vista de planta del piso superior, donde se hallan los helipuertos. Fuente: Elaboración propia en Anylogic

- 1, 2: Ascensores Norte y Sur, respectivamente.
- 3: Escalera Mecánica
- 4, 5, 6: Colas para los helipuertos Norte, Central y Sur, respectivamente.
- 7: Helipuerto Norte
- 8: Helipuerto Central
- 9: Helipuerto Sur

4.1.2. Servicios

En la planta baja hay dos zonas dedicadas a servicios para los viajeros o transeúntes que puedan entrar en la estación sin necesidad de viajar. La creación de una estación suele venir de la mano de una oportunidad de negocio de alquiler de locales y su inclusión aporta una mayor verosimilitud al modelo.

En primer lugar, en la zona superior encontramos una zona dedicada a la restauración que alberga una cafetería y un restaurante de comida rápida. En el mismo

piso también se encuentra el puesto de información, así como una tiendas de ropa y unos aseos. Por último, en este piso se encuentra también el almacén de baterías.

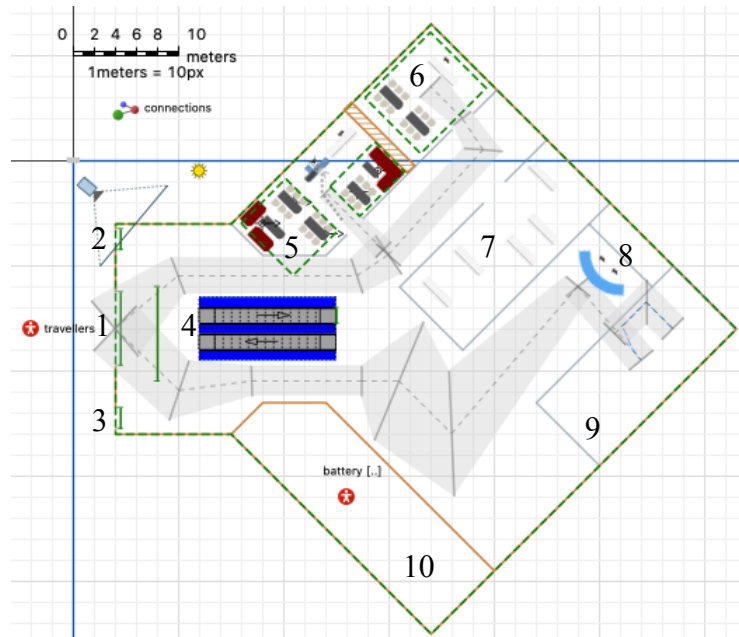


Figura 10: Vista de planta del piso inferior, dedicado a servicios. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

- 1: Entrada al edificio.
- 2, 3: Ascensores Norte y Sur, respectivamente.
- 4: Escalera Mecánica.
- 5, 6, 7: Cafetería, restaurante y comercio, respectivamente.
- 8: Mostrador de información.
- 9: Aseos
- 10: Almacén de baterías.

4.1.3. Funcionamiento Normal de los Aerotaxis.

En la Tabla 1 se han repasado los conceptos de aerotaxis más prometedores. Se ha optado por el modelo de Lilium por ser el que destaca en prestaciones en un mayor número de categorías. Además, al tratarse de un eVTOL con rotores y alas, puede maniobrar en espacios reducidos como son los helipuertos de la estación para, posteriormente entrar en modo crucero y llegar más rápidamente a destino. El aerotaxi se modelará atendiendo a las prestaciones definidas en Bacchini & Cestino (2019). Se trata de un modelo con capacidad para cinco pasajeros de 12 metros de envergadura y una

masa total de 1700 kg vacío y sin batería. Cada batería pesa 900 kg adicionales y soporta una carga de 38 kWh.³²



Figura 11: Vista de planta del modelo para cinco pasajeros de Lilium. (Bacchini & Cestino, 2019)

Los aerotaxis llegan y aterrizan en una pista que esté disponible. En caso de no estar disponible ninguna, los aerotaxis sobrevuelan la estación hasta que se libere una pista. Al aterrizar, los aerotaxis entregan su batería y la reponen por una nueva. La estación dispone de un número de baterías que se recargan mientras están en reposo para estar listas cuando lo requiera el siguiente vehículo.

Se anticipa importante tener en cuenta los tiempos de maniobra de despegue y aterrizaje del aerotaxi. Es por ello que un nuevo vehículo no puede aterrizar en una pista hasta que el vehículo que se encontraba en ella no finalice la maniobra de despegue y pase al modo crucero. En el modo crucero, los aerotaxis viajan a una velocidad que se supone constante hasta llegar a su estación de destino. Además, la batería se descarga más deprisa durante el despegue que durante el vuelo de crucero y en ambos casos se descarga más rápido que durante el aterrizaje.

³² Bacchini & Cestino (2019)

4.1.4. *Funcionamiento Normal de la Estación*

Los viajeros se dirigen al piso superior de la estación, donde deberán guardar fila frente a los helipuertos por orden de llegada (Política FIFO). Cada viajero tendrá asignado un destino que conoce de antemano (antes de entrar a la estación), y que comunicará al aerotaxi al subirse mediante una aplicación en su teléfono móvil. Además, si un viajero ha esperado por demasiado tiempo, puede optar por abandonar la estación descontento con el servicio y tomar un medio de transporte alternativo hasta su destino.

4.2. Identificación de los Agentes, Flujos y Procesos.

Se ha optado por desarrollar el modelo conceptual apoyándose en el marco “Robinson” definido al efecto en Furian et al. (2015). Esto supone que es necesario en primer lugar identificar las casuísticas que se modelarán bajo una u otra estrategia de simulación (el marco Robinson se refiere a ello como estructura del sistema), los agentes que recorren los flujos de procesos (entidades y recursos del Sistema), los flujos de procesos discretos (colas y actividades del sistema), y el comportamiento del sistema. En segundo lugar se deben identificar correctamente todas las variables del sistema y parámetros, teniendo en consideración también si estos últimos son realmente parámetros estáticos o si, en su lugar, se trata de variables de decisión del modelo.

4.2.1. Agentes del Modelo

A continuación se enuncian aquellas entidades que han sido identificadas como agentes.

Estación (Main o Agente Principal): Se trata del agente más evidente, pues es la entidad de nivel superior ya que es sobre ella sobre la que se desarrollará el estudio. En este agente deberán habitar las poblaciones del resto de agentes, así como los diagramas de flujo de procesos descritos para las mismas. En una red real de aerotaxis se podría obtener un agente con una jerarquía todavía superior a éste. Se trataría del agente que representase a la propia red en el mapa (y sobre el que se instanciarían varios agentes “Estación” en una posición fija, entre los que se simularían vuelos de Aerotaxi). Puesto que el estudio de la red queda fuera del alcance de este trabajo, se simularán las llegadas y salidas de aerotaxis y viajeros mediante distribuciones de probabilidad. Sin embargo, resulta necesario señalar que el diseño realizado en este trabajo, al utilizar la simulación basada en agentes, permitiría instanciar el agente estación en una red de aerotaxis, por lo que podría emplearse para futuros proyectos.

Aerotaxis: Son manejados por una IA de a bordo y por tanto deben tomar decisiones en función del estado de su entorno, además de recibir órdenes de la estación

por ser éste el agente superior. Los aerotaxis deben tener su propio funcionamiento perfectamente descrito dentro del código del propio agente “AeroTaxi” (que será creado en el capítulo 4), sin embargo, se deberán instanciar en la estación para que aparezcan aerotaxis singulares con sus peculiaridades únicas.

Transeúntes: Los transeúntes son personas que, sin ser viajeros, entran en la estación, bien sea para acompañar/recibir a viajeros, para utilizar los servicios de la estación o bien tan sólo para curiosear por la misma. No añaden ninguna funcionalidad especial a la estación ni cambian la manera de interactuar de los viajeros con los aerotaxis, sin embargo, se deben añadir para tener en cuenta el aspecto de negocio de la estación, ya que sí generan ingresos. Son agentes ya que deben tomar decisiones como a dónde van o si deben esperar. Además, los transeúntes vienen incorporados como agentes nativos en Anylogic, por lo que no será necesario modelar el agente y bastará con modelar únicamente su comportamiento dentro de la estación.

Viajeros: Los viajeros se diferencian de los transeúntes en su comportamiento dentro de la estación, pues en lugar de dirigirse a las zonas de servicios se dirigirán al piso superior, donde deberán hacer cola y se unirán a un aerotaxi para efectuar el viaje.

Baterías (Recurso): Por último, se optará por definir las baterías como agentes propios en lugar de un vector de variables. De esta manera, se podrá configurar su funcionamiento fácilmente y se podrá estudiar la posibilidad de disponer de más o menos baterías en función de las necesidades que demande el modelo.

4.2.2. *Flujos y Depósitos (Sistemas Dinámicos)*

Nivel de la batería: El nivel de la batería deberá representarse como un depósito con un flujo tanto de entrada como de salida, cuyos valores deben ser condicionados por el estado en el que se encuentre el aerotaxi. De este modo, el valor para el flujo de entrada a la batería (carga) será un número real cuando la batería se encuentre en recarga, y cero cuando la batería abandone la zona de recarga. De la misma manera, el valor del flujo de

salida (consumo/descarga) será cero a no ser que el vehículo se encuentre en vuelo. En caso de encontrarse en vuelo, se pueden asignar valores distintos al flujo de descarga en función de la maniobra que esté realizando el aerotaxi en ese momento (el consumo es mucho más alto durante la fase de despegue que durante las fases de vuelo en crucero y aterrizaje. Este depósito habitará dentro del agente “Batería” (ver 3.3.1 Agentes del Modelo)

Costes de la Estación: También se modelará como un depósito bajo el paradigma de los sistemas dinámicos, pues es también un fenómeno de naturaleza dinámica. Se identifican dos flujos de entrada a los costes. El primero constituye los costes de personal de la estación, que será un flujo constante. El segundo representa los costes asociados a la energía consumida. Este segundo flujo será a su vez una suma entre el gasto eléctrico del edificio, que se supondrá constante por hora, más el gasto en recargar las baterías, que es variable y dependerá del número de baterías que se encuentren recargándose en ese momento.

4.2.3. *Procesos y Eventos (Eventos Discretos)*

Llegada de viajeros: La llegada de viajeros cae dentro del dominio de los eventos discretos. Los viajeros llegan a la estación según una determinada distribución de llegadas discreta (como puede ser una distribución Binomial o una de Poisson). Además, los viajeros también se ven involucrados en otros procesos discretos como la cola que deben guardar antes de subir al vehículo.

Llegada de aerotaxis: Los vehículos también llegan siguiendo la misma distribución que los viajeros, lo cual resulta lógico, pues salieron de la estación de origen siguiendo el mismo patrón que siguieron los pasajeros al llegar a la misma. Una vez han llegado a los alrededores de la estación, deben seguir un flujo de procesos que simulen el aterrizaje y la espera a la liberación de una pista.

Llegada de transeúntes: Igual que ocurre con la llegada de viajeros, las llegadas transeúntes se modelarán según una distribución discreta. También se debe modelar un flujo de procesos discretos que recree su comportamiento dentro de la estación.

4.3. Definición de las Variables y Parámetros de Simulación

Se han de identificar las dimensiones que afectan al comportamiento de la estación. Se ha de diferenciar, además, cuáles de éstas deben ser consideradas como variables y cuáles como parámetros. La diferencia entre ambos es esencial para cumplir los objetivos propuestos.

Una variable es una expresión cuyo valor no es fijo en el tiempo. Las variables se pueden medir en cualquier momento del experimento y dan una idea del estado en el que se encuentra el sistema en ese instante. Son, por lo general, salidas del sistema, o bien salidas de subsistemas internos que sirven como datos de entrada a subsistemas cercanos. Una variable sería, por ejemplo, el tiempo medio de espera de un pasajero dentro de la estación, pues éste variará cada vez que un nuevo pasajero realice un viaje.

Los parámetros, en cambio, sí se mantienen fijos durante el transcurso del experimento y representan características conocidas de antemano, generalmente fenómenos físicos o descriptivos del sistema. Ejemplos de parámetros serían la aceleración de la gravedad, o la distancia entre dos nodos dentro de una red de transporte existente, también serían parámetros el género de una persona o sus credenciales. En principio, los parámetros no deberían variar entre experimentos. En caso de poder variar reciben el nombre de variables de decisión, pues decidir entre un valor u otro para una determinada característica es una de las metas que se persiguen con la simulación ya que puede afectar al comportamiento general del sistema (al valor de las variables). Ejemplos de variables de decisión serían el número de baterías del que se debe disponer en la estación (si se utilizan muy pocas, por ejemplo, pueden formarse colas en el acceso por no estar listos los aerotaxis; si se utilizan demasiadas puede resultar altamente costoso e ineficiente) o el número de helipuertos disponibles.

Para este proyecto se han identificado las siguientes variables:

- Tiempo de espera de un viajero a un aerotaxi: $t_{viajero}$
- Tiempo de espera en pista de un aerotaxi (esperando a un pasajero): t_{taxi_pista}

- Tiempo de espera en vuelo de un aerotaxi (esperando a una pista disponible):

$t_{\text{taxi_vuelo}}$

- Número de personas en la estación: n_{personas}
- Coste de operación de la estación (depósito): $c_{\text{estación}}$
- Coste energético (flujo): $c_{\text{energético}}$
- Nivel de carga de las baterías (depósito): $e_{\text{batería}}$

Y parámetros:

- Coste de operación y mantenimiento de la estación (flujo): C_{OM}
- Tiempo empleado por un aerotaxi en la maniobra de despegue: T_{DES}
- Tiempo empleado por un aerotaxi en la maniobra de aterrizaje: T_{ATZ}
- Coste de la energía: C_E
- Velocidad de carga de las baterías (flujo): e_{CARGA}
- Velocidad de descarga de las baterías (flujo): $e_{DESCARGA}$
- Capacidad de las baterías: E_{CARGA}

Por último se han identificado las siguientes variables de decisión:

- Número de pistas de aterrizaje/ despegue (helipuertos): d_p
- Número de baterías disponibles (en el escenario de cambio de batería) : d_b

NOTA: Para mantener una nomenclatura adecuada se ha optado por el uso de mayúsculas para los parámetros y minúsculas para las variables, como es habitual en los trabajos de modelado y simulación.

4.4. Desarrollo del Modelo Conceptual

Teniendo en cuenta lo expuesto en los anteriores apartados, se puede proceder a construir un modelo conceptual. Se trata de un modelo ilustrativo para el desarrollador que no puede ser ejecutado por un software, por lo que existe una relativa libertad a la hora de plantearlo. Un buen modelo conceptual debería prescindir de nombres de variables y emplear en su lugar conceptos que representen lo que ocurre físicamente en el sistema real. Por ejemplo, en lugar de modelar una transición cuando “Batería = 0” resulta más conveniente para el modelo conceptual utilizar como condición “Se agota la batería”.

A continuación se presenta el modelo conceptual propuesto para cimentar la construcción del modelo definitivo. En primer lugar se expone el modelo para el agente “viajero”. Los dos elementos que no quedan recuadrados representan la creación y destrucción de agentes “viajero” al entrar y salir de la estación. Éstos no deberían estar incluidos en la definición del agente, pues los agentes se generan y destruyen al principio y al final de cada flujo de eventos discretos. Se han añadido, sin embargo, al diagrama conceptual para facilitar la comprensión del funcionamiento del agente.

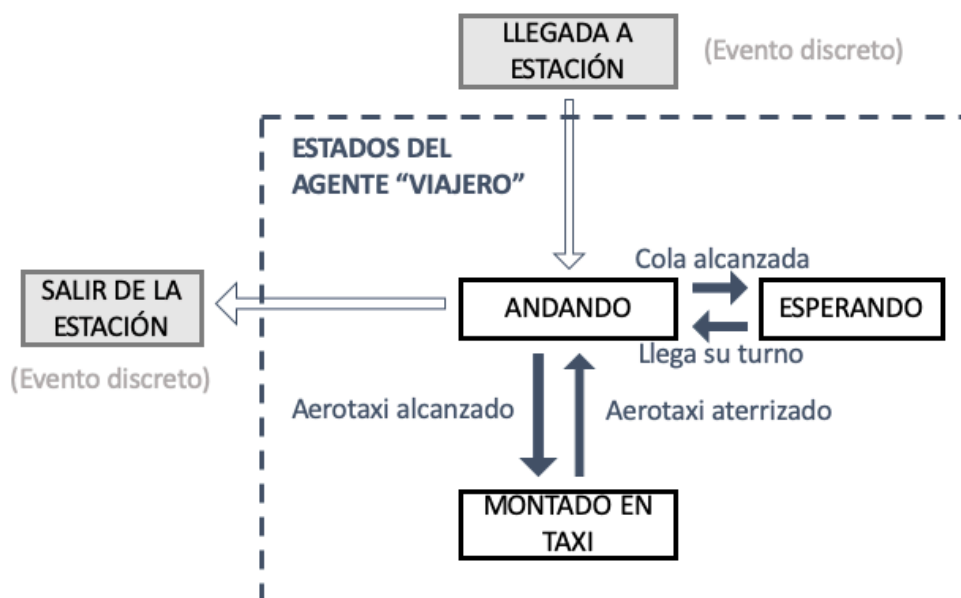


Figura 12: Modelo conceptual para el agente “Viajero”. Fuente: Elaboración propia

Para el agente Aerotaxi se ha desarrollado el siguiente diagrama de estados conceptual. A parte de los estados y las transiciones, se muestran los recursos que emplea el agente, así como las órdenes que emite hacia agentes externos (en este caso hacia el agente “Estación”):

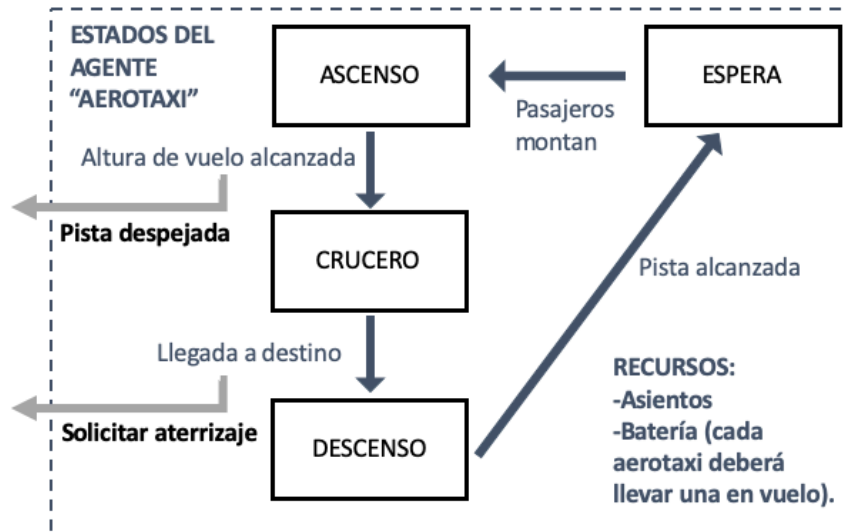


Figura 13: Modelo conceptual para el agente "Aerotaxi". Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el modelo para el agente Batería. En este caso se incluye tanto un diagrama de estados como uno de flujos y depósitos (que habitará dentro del propio agente ya que es una característica inherente al mismo), pues se ha optado por modelar el nivel de la batería y su carga y descarga utilizando para ello la estrategia de modelado por sistemas dinámicos.

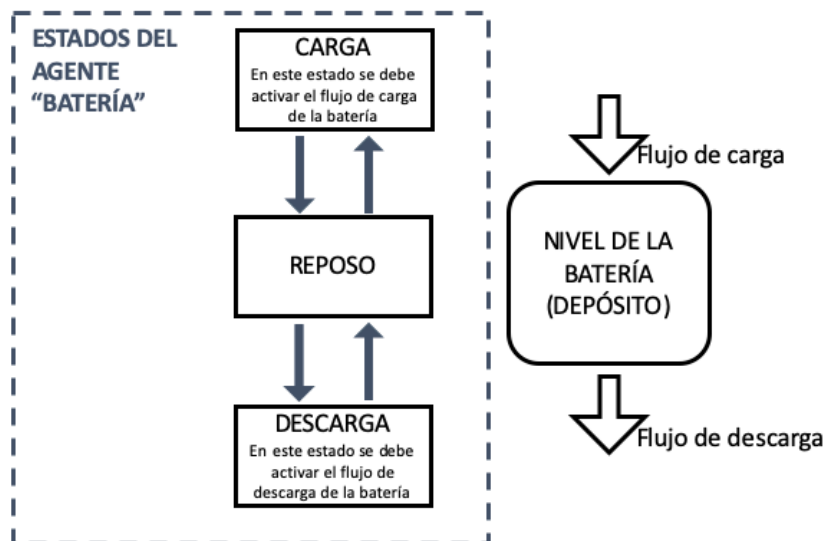


Figura 14: Modelo conceptual para el agente "Batería". Fuente: Elaboración propia

Por último, se presenta el diagrama conceptual del agente “Estación”. Al ser un agente principal (esto es, de jerarquía superior al resto de agentes), no dispone de estados, sino que su finalidad consiste en albergar a las poblaciones de los otros agentes así como la recreación del espacio físico que representa la estación (plano de las instalaciones)

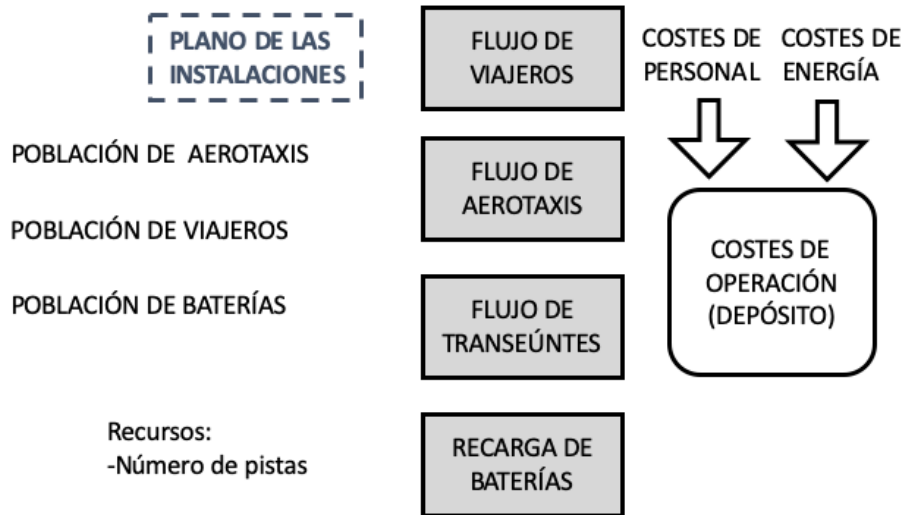


Figura 15: Modelo conceptual para el agente “Estación”. Fuente: Elaboración propia

Dentro del agente “Estación” deben habitar también los diagramas de flujo de procesos que ocurren en la misma. A continuación, se pasa a elaborar el modelo conceptual para las casuísticas identificadas como eventos discretos, comenzando por la llegada de viajeros al sistema.

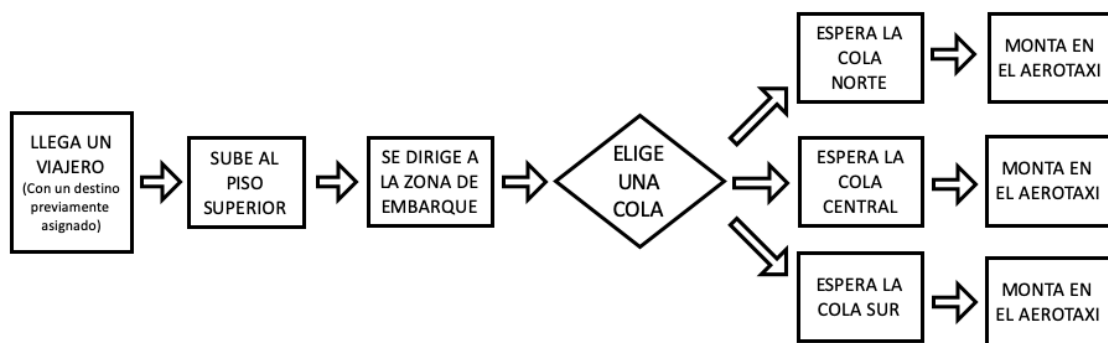


Figura 16: Diagrama de flujo de eventos discretos conceptual para el comportamiento de los viajeros en la estación.

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, el siguiente diagrama representa la llegada de aerotaxis en el modelo conceptual.

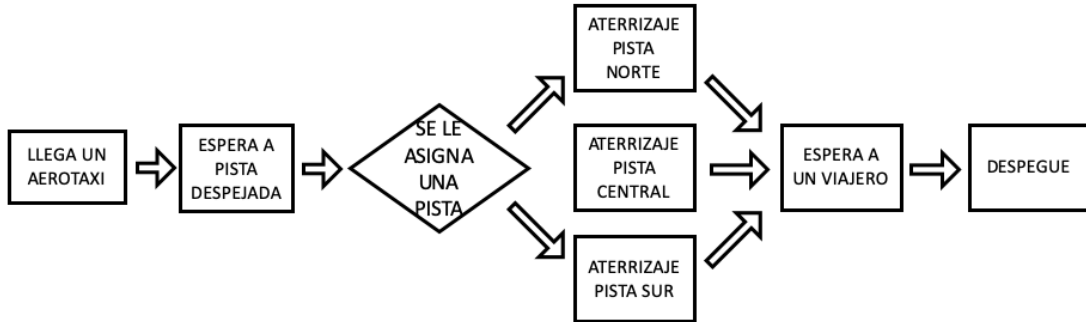


Figura 17: Diagrama de flujo de eventos discretos conceptual para el comportamiento de los aerotaxis en la estación. Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el flujo conceptual que representa la recarga de baterías.

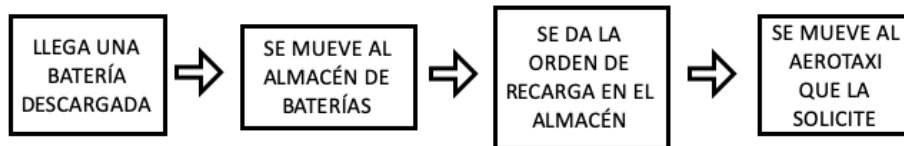


Figura 20: Diagrama de flujo de eventos discretos conceptual para la recarga de baterías. Fuente: Elaboración propia

Por último, se describe el flujo de transeúntes dentro de la estación. En un principio se pretendía simular en detalle movimientos como las esperas en la cola de la cafetería o restaurante, sin embargo, se corre el riesgo de caer en una sobrerrepresentación del sistema ya que no se está realizando un análisis del comportamiento de los clientes sino del funcionamiento global de la estación.

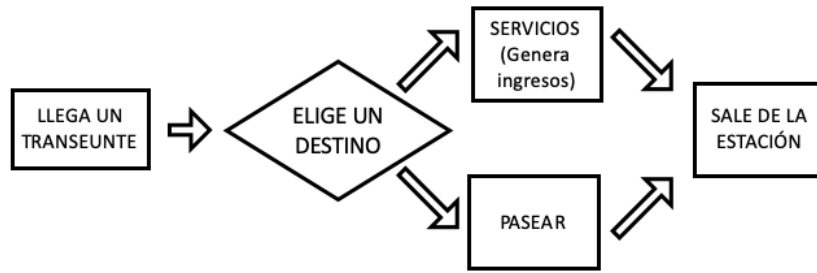


Figura 19: Diagrama de flujo de eventos discretos conceptual para el comportamiento de los transeúntes en la estación. Fuente: Elaboración propia

4.5. Supuestos

Se trabaja sobre un escenario hipotético en el que se han resuelto ya los problemas regulatorios que impiden el uso actual del aerotaxi como medio de transporte urbano.

Cada cambio de batería del vehículo no requiere de una comprobación posterior del vehículo por parte de un equipo de inspección técnica, como sí es el caso de los aviones comerciales entre vuelo y vuelo. Esto no significa que no se realicen inspecciones, sino que se va a suponer que éstas se pueden realizar una vez al día y seguir cumpliendo con los estándares de seguridad exigidos. La realización de inspecciones no se simulará y se supondrá que se efectúa retirando el vehículo de la pista y sustituyéndolo por un reemplazo.

Por simplicidad, las maniobras del vehículo en detalle se representarán por medio de funciones de retardo. Es decir, se obtendrá información de fuentes fiables acerca de la duración de las maniobras y se sustituirá por un bloque de retardo o *Delay*, cuyo valor dependerá de la maniobra que esté realizando el aerotaxi.

Se supone la llegada de pasajeros y transeúntes según una distribución de Poisson, cuyo valor cambiará según la franja horaria en la que se encuentre operando la estación.

Se supone la llegada de aerotaxis según la misma distribución, pues los aerotaxis han despegado de otro extremo de la línea en el que se supone que los viajeros llegan siguiendo también una distribución de Poisson.

4.6. Conclusiones del Capítulo 4

Se ha presentado la estación y discutido su funcionamiento. También se han identificado las casuísticas a simular y se ha seleccionado una estrategia de simulación apropiada para cada caso. Se ha obtenido como resultado un modelo conceptual desglosado en bloques que representa el funcionamiento de la estación en su conjunto. Por último, se han mencionado los supuestos que se han tomado a la hora de realizar el modelo. Todo ello se ha realizado desde la premisa de desarrollar un modelo lo menos complejo posible sin sacrificar la finalidad del mismo.

Además, se ha procurado realizar un modelo escalable para futuras ampliaciones del proyecto. Es decir, se ha desglosado el modelo en agentes que son instanciables en otros agentes de jerarquía superior y permitirán utilizar el modelo para simulaciones más complejas. Este sería el caso si en un futuro se decide simular una red de aerotaxis completa que incluya varias estaciones (el agente estación podría instanciarse múltiples veces dentro de la red) o que gestione las rutas realizadas por los aerotaxis (nótese que, por ejemplo, para el agente “Aerotaxi”, se ha definido un estado de velocidad de crucero, sin embargo, este estado no entraría el juego en este modelo, ya que a la estación sólo afectan los despegues y aterrizajes de vehículos. Este estado, sin embargo, sería de gran utilidad si se pasasen a simular los trayectos mediante, por ejemplo, simulación geográfica o GIS).

A continuación se pasa a detallar el modelo definitivo realizado en el software Anylogic y basado en todo lo descrito en este capítulo.

5. Desarrollo del Modelo de Simulación.

Una vez construido el modelo conceptual, se pasará a desarrollar el modelo final en Anylogic. Este capítulo se presentará como una guía paso a paso por todo el proceso, incluyendo los diagramas de estados y flujos de procesos descritos en el modelo conceptual adaptados al software, así como los agentes. No se incluirán, sin embargo, detalles del modelo como pueden ser las propiedades de procesos y variables creados en el modelo.

El modelo se estructurará de la siguiente manera. En primer lugar, se presentará el modelo del agente principal (“Estación”), así como los modelos construidos para el resto de agentes del sistema, incluyendo sus diagramas de flujo, propiedades, variables y parámetros.

En segundo lugar, se expondrán los diagramas de flujos y depósitos que representen aquellos fenómenos de naturaleza dinámica.

Por último, se incluirán y explicarán los diagramas de flujo de eventos discretos que modelan el comportamiento de los agentes dentro del sistema.

5.1. La Estación: Agente Principal

La estación representa el objeto de interés para el estudio. Es por ello que, como se ha explicado ya en el capítulo 3, debe tomarse como agente principal del modelo. Anylogic requiere de un agente principal de jerarquía superior donde vayan a habitar el resto de agentes, tanto nativos como agentes del modelo.

La definición en Anylogic del agente del modelo “Estación” requiere incluir cinco tipo de agentes. En primer lugar, se deben incluir el resto de agentes del modelo. Estos agentes del modelo habitarán en el agente principal como una población (una población de agentes es una sucesión de agentes del mismo tipo instanciados múltiples veces y que pueden ser generados, destruidos y modificados dentro del modelo), pero serán definidos fuera del agente del modelo principal “Estación” de manera similar a cómo se definen los drivers de un programa en código fuera del main (y que, posteriormente, son llamados por el main para hacer uso de las clases y métodos que definen). Además, para el agente del modelo “Batería”, se debe incluir también un banco de recursos (en Anylogic este agente se conoce como Resource Pool) que gestione la cantidad de baterías disponibles. También se incluye un banco de recursos para gestionar las pistas de despegue y aterrizaje disponibles (helipuertos).

En segundo lugar, se debe dar cabida a la presentación de la estación. En Anylogic, el término presentación hace referencia al aspecto gráfico del agente. En el caso de un agente del modelo no principal como el agente “Aerotaxi”, la presentación tan sólo debe incluir una figura de un aerotaxi. En el caso del agente del modelo principal “Estación”, la presentación debe incluir el diseño gráfico de la propia estación con todos sus elementos (accesos, paredes, personal, pistas de aterrizaje/ despegue, servicios, etc.).

En tercer lugar, se deben incluir los agentes que describen los diagramas de flujos de procesos que tienen lugar en la estación. Se han identificado cuatro flujos de procesos, que en el modelo reciben los siguientes nombres:

- **FC_Arrivals**: Flujo de procesos que gestiona las llegadas y despegues de aerotaxis.

-FC_Travellers: Flujo de procesos que describe las llegadas de pasajeros, su subida al piso superior, y su espera al aerotaxi.

-FC_Batteries: Flujo de procesos que gestiona el movimiento de las baterías descargadas de los aerotaxis al almacén y de baterías cargadas en el sentido contrario.

-FC_Pedestrians: Flujo de procesos que describe los movimientos de los transeúntes dentro de la estación.

En cuarto lugar, deben habitar en el agente del modelo “Estación” los diagramas de flujos y depósitos que modelan aquellas casuísticas identificadas como modelables bajo el paradigma de los sistemas dinámicos. En este caso se trata del flujo de costes de la estación (SD_Costs).

Por último, en quinto lugar deben habitar en el agente del modelo “Estación” las gráficas y elementos de interacción del modelo. En este caso, existen tres elementos de interacción: el que permite inyectar aerotaxis en la estación el que permite liberar aerotaxis para un despegue forzado por el usuario, y el que permite modificar el valor del número de baterías disponibles en almacén.

Adicionalmente, también deben habitar dentro del agente principal del modelo las variables, parámetros, y variables de decisión del modelo, descritas en el apartado 3 del capítulo anterior.

A continuación se presenta el diseño del agente principal del modelo “Estación”:

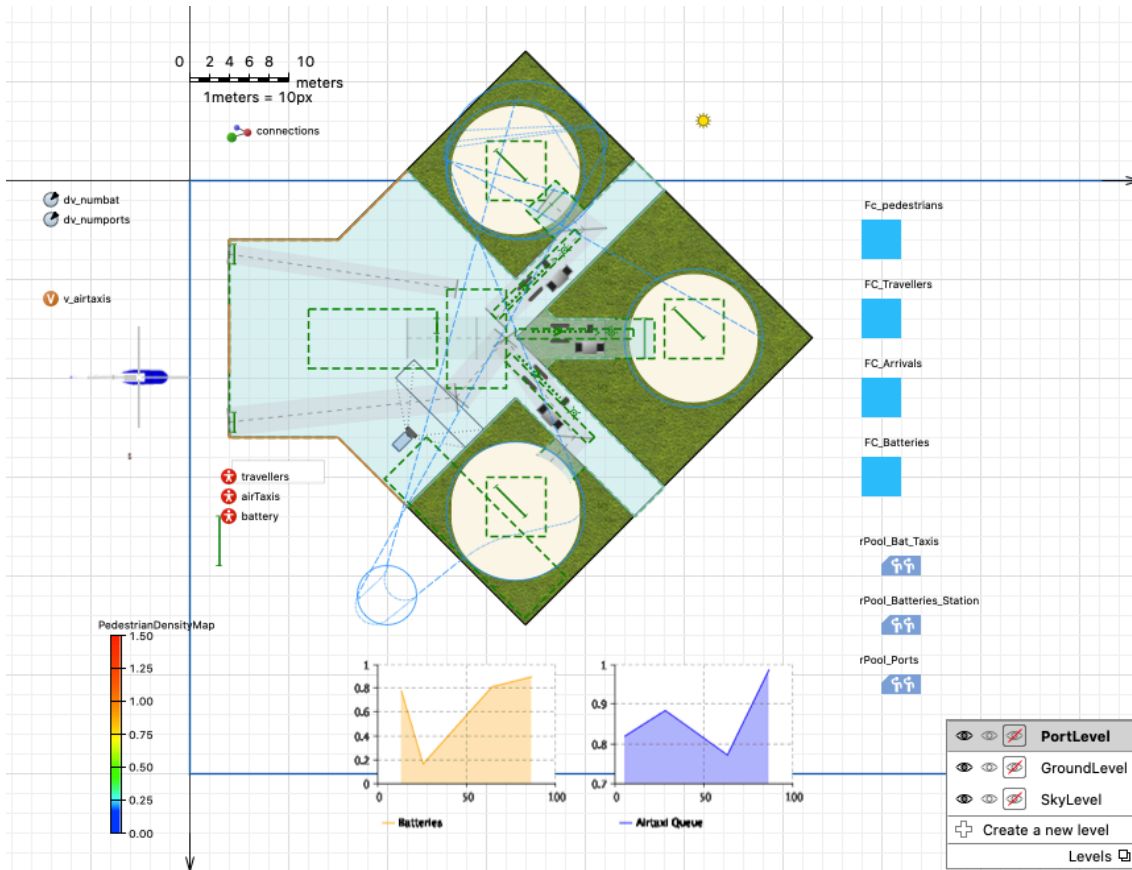


Figura 20: Vista del agente del modelo “Estación” diseñado en Anylogic. Fuente: Elaboración propia en Anylogic

Niveles: Anylogic permite, en el modo presentación, la creación de distintos niveles o alturas (en Anylogic se conocen como “Levels”). Para el diseño de la estación se han definido tres niveles. A continuación se describirán los tres niveles así como los elementos y agentes que se encuentran alojados en cada uno:

5.1.1. Nivel 0: GroundLevel

En este nivel se encuentra ubicada la planta baja de la estación. Este es el nivel al que entran los viajeros y transeúntes. Se ha definido con $z=0$ (donde z representa la altura con respecto al origen de coordenadas). En este nivel se alojan los siguientes elementos:

- Paredes: Describen las paredes del edificio y delimitan físicamente las zonas.

- Líneas de destino (Target Lines): Se trata de las líneas de las que hacen uso los agentes para moverse por el sistema. Se han definido las siguientes líneas de destino, cuyo nombre comenzará siempre por “tl_”:

- **tl_entrance:** Se trata de la línea por la que entran los viajeros y transeúntes al edificio.
- **tl_hall:** Es una línea intermedia a la que se dirigirán los viajeros antes de poner rumbo al piso superior. Su finalidad reside en establecer una zona dentro del edificio a la que y evitar con ello que los viajeros suban al piso superior por la parte exterior del edificio (ya que Anylogic no entiende si un viajero tiene que subir el ascensor por la parte interior o exterior del edificio).
- **tl_liftdown_top** y **tl_liftdown_bot:** Describen por dónde entran los viajeros a los ascensores Norte y Sur, respectivamente.

-Áreas: Delimitan zonas en las que se desarrollan ciertas actividades o a las que se deben dirigir ciertos agentes. Se han definido las siguientes áreas, cuyo nombre comenzará siempre por “area_”.

- **área_batteries:** Delimita el área en el que se encuentran almacenadas las baterías.
- **área_burger:** Delimita el área del restaurante de comida rápida
- **area_coffee:** Delimita el área de la cafetería.

-Sendas (Paths): Describen las rutas que pueden seguir determinados agentes. Además, permiten hacer recuento automático de las cantidad de viajeros y transeúntes que pasan por ellas (*PedestrianDensityMap*) empleando para ello un mapa de densidades. Se han definido las siguientes sendas, cuyo nombre comenzará siempre por “path_”.

- **path_foodcourt:** Describe la senda por la cual los transeúntes se dirigen a la zona de restauración.

- ***path_services***: Describe la senda por la cual los transeúntes se dirigen al mostrador de información o a los aseos.
- Nodos de red (Network nodes): Los nodos de comunicación describen puntos dentro de una red entre los cuales hay un intercambio de información o recursos. En este caso, los nodos comunican los helipuertos con el almacén de baterías para definir rutas por las que las baterías cargadas y descargadas se mueven entre almacén y helipuertos. Se ha optado por la nomenclatura “n_” para los nodos de red.
- ***n_batteries***: Establece el nodo que permite establecer una red de flujo de recursos materiales desde el almacén de baterías hasta los helipuertos.
- Escaleras mecánicas: Las escaleras mecánicas constituyen un agente nativo de Anylogic. En la estación se ha colocado un juego de escaleras mecánicas en ambas direcciones que permiten comunicar los dos pisos sin necesidad de utilizar para ello los ascensores.
- Objetos 3D: Se han incluido, adicionalmente y para aportar realismo a la estación, una serie de objetos en 3D como mostradores, sillas y mesas o estanterías.

5.1.2. Nivel 1: PortLevel

En este nivel se encuentra todo lo referente al aspecto funcional de la estación. Tanto las pistas de despegue/ aterrizaje (helipuertos) como las zonas de espera de los pasajeros se encuentran ubicadas en este nivel. El nivel se ha definido a una altura de 6m respecto al origen de coordenadas.

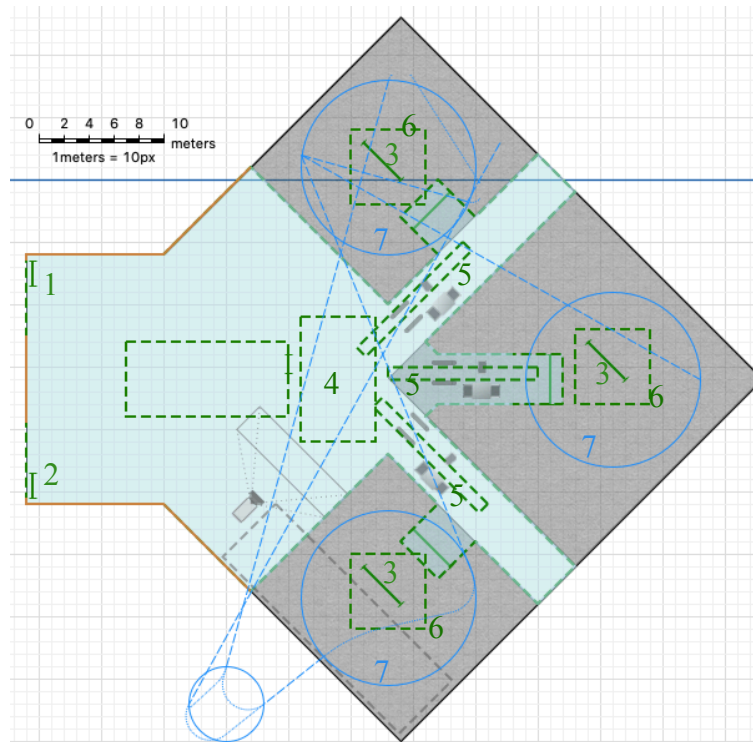


Figura 21: Vista de los elementos de uso del espacio del nivel 1 del agente "Estación" diseñado en Anylogic.

Fuente: Elaboración propia en Anylogic

Al igual que se ha hecho con el nivel 0, se describirán a continuación los elementos de presentación e interacción con el espacio del nivel 1:

- Líneas de destino (Target Lines):
 - *tl_liftup_top* y *tl_liftup_bot* (1 y 2): Describen por dónde salen los viajeros en el de los ascensores Norte y Sur, respectivamente.
 - *tl_land_X* (3): Describen las líneas por las que los aerotaxis llegan a la pista de aterrizaje tras el descenso. Donde X es el número de pista correspondiente.

- Áreas :
 - *a_wait* (4): Se trata de un área intermedia a la que los pasajeros se dirigen antes de elegir la pista. En esta área deciden qué cola van a hacer.

- ***a_wait_X (5)***: Áreas donde los pasajeros esperan su turno para coger el aerotaxi en la pista X.
 - ***a_port_X (6)***: Designan las áreas donde los aerotaxis esperan a los pasajeros en los helipuertos y viceversa. Donde X es el puerto correspondiente
- Nodos de red (Network nodes):
- ***n_port_X (7)***: Designan los nodos donde los aerotaxis depositan sus baterías vacías para ser enviadas al almacén y reciben las recargadas del almacén.
- Objetos 3D: Tornos de acceso a la pista, cinta de rayos X y detector de metales.

5.1.3. Nivel 3: SkyLevel

Por último, en este nivel, que representa el espacio aéreo, se encuentra el punto de llegada de los aerotaxis al agente del modelo “Estación”. Se encuentra elevado a una altura igual a la altura de vuelo de los aerotaxis (que es un parámetro del sistema).

- Líneas de destino (Target Lines):
- ***tl_sky (1)***: Representa la línea por la que entran los aerotaxis a la estación.
 - ***tl_sky_X (2)***: Representa la línea que deben cruzar los aerotaxis para descender al puerto X.
- Áreas:
- ***a_sky (3)***: Es el área en la que los aerotaxis que llegan tendrán que esperar en caso de encontrarse ocupados todos los helipuertos.
 - ***a_sky_X (4)***: Área desde la cual los aerotaxis comienzan el descenso a la estación. La maniobra de descenso se aproximará por un bloque de retardo en la que los aerotaxis esperan el tiempo de descenso en éste área.

Se ha creado también un banco de recursos r_Pool_Ports (ver 4.5.1. *Gestión de los Bancos de Recursos*) que basa su capacidad en el número de nodos en el nodo de área n_ports .

La idea detrás de esta estrategia es pasar como argumentos para las ubicaciones donde los aerotaxis tienen que efectuar las maniobras las líneas de destino y áreas definidas en el agente. Esto, en combinación con la posibilidad de establecer la capacidad del banco de recursos en función del número de nodos atractores (así como la posición de estos últimos) permite a cada aerotaxi dirigirse correctamente a cada puerto sin importar la disposición de los puertos en la estación mientras se hace uso del banco de recursos correctamente.

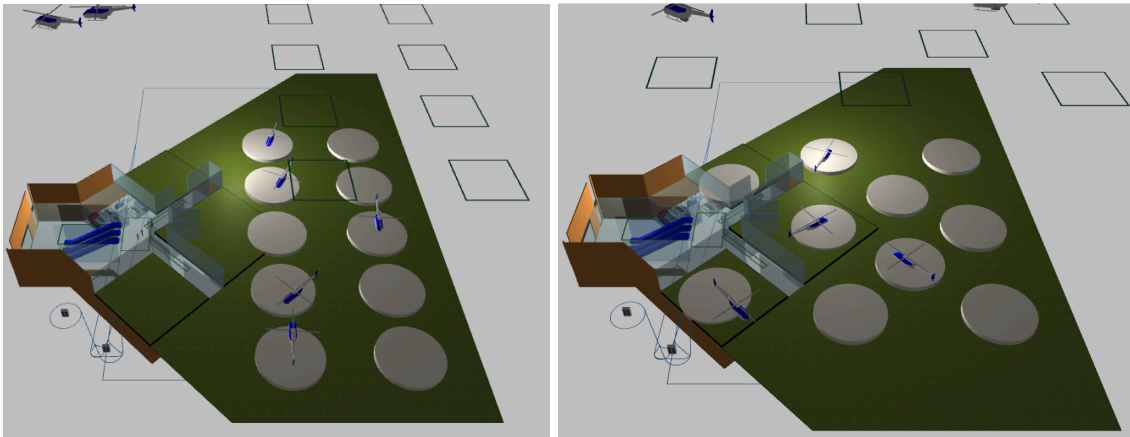


Figura 23: Vista 3D de dos simulaciones con diferentes configuraciones de puertos. Fuente: Elaboración propia en Anylogic

5.2. Otros Agentes del Modelo

5.2.1. Agente Aerotaxi

El comportamiento de los aerotaxis puede dividirse en cinco etapas, a saber, aterrizaje, reposo, cambio de batería, despegue y vuelo. De manera homóloga de ha definido el agente Aerotaxi operando en base a cinco estados según el siguiente diagrama de estados. Los cinco estados y las transiciones entre ellos quedan descritos a continuación.

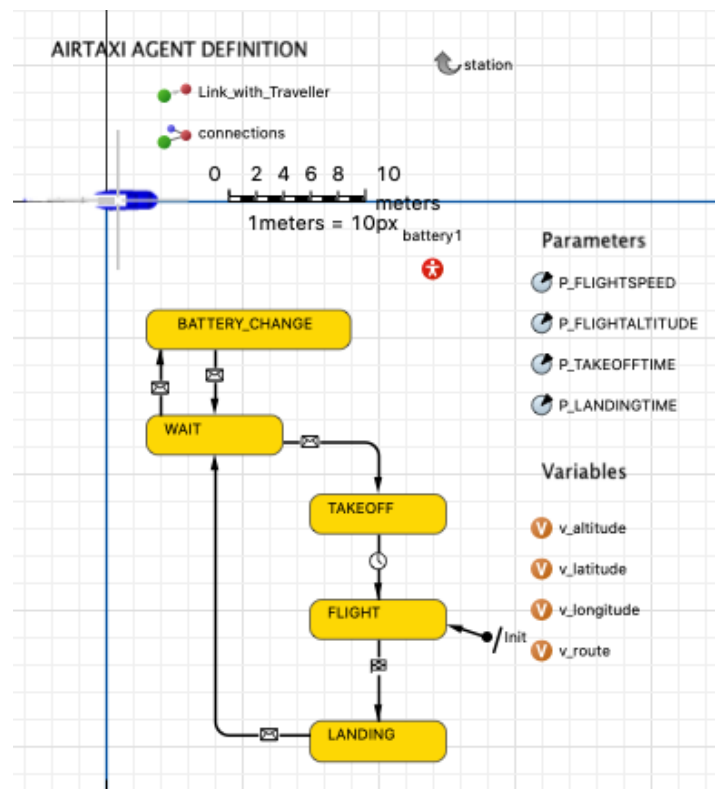


Figura 24: Vista principal del agente Aerotaxi. Fuente: Elaboración propia en Anylogic

- **WAIT (Esperar en el puerto):** Se trata del estado principal del agente. El agente estará en este estado cuando se encuentre en un helipuerto y no esté efectuando un cambio de batería. En el momento en que el aerotaxi entrega su batería descargada al sistema, éste último le envía el mensaje “Change battery”, lo que activa la transición del agente al estado *BATTERY_CHANGE*. En cuanto el aerotaxi recibe la orden de despegue (mensaje “Takeoff”), el agente efectúa la transición al estado *TAKEOFF*.

- **BATTERY_CHANGE (Cambiar batería):** En este estado el aerotaxi se halla a la espera de una nueva batería recargada. En cuanto recibe la batería, efectúa la transición al estado *WAIT*.
- **TAKEOFF:** Representa al aerotaxi despegando. En este momento el consumo de batería es máximo. El agente sale de este estado en cuanto alcanza la altura de vuelo (parámetro *P_FLIGHTALTITUDE*), pasando al estado *FLIGHT*.
- **FLIGHT:** Representa al aerotaxi en vuelo. En este estado se va a suponer que el aerotaxi avanza a una velocidad constante igual al parámetro *P_FLIGHTSPEED*. En el momento en que recibe permiso para aterrizar (mensaje "Land"), realiza una transición al estado *LANDING*.
- **LANDING:** El aerotaxi estará en este estado cuando se halle efectuando la maniobra de aterrizaje. El estado termina cuando toca tierra (su altura es igual a la altura del nivel *PortLevel*).

Además, en este agente del modelo también habitan las variables y parámetros característicos del aerotaxi, descritos a continuación:

- **P_FLIGHTSPEED:** Parámetro de velocidad de crucero del aerotaxi. En este caso, por tratarse del Lilium de cinco plazas, la velocidad de crucero es de 290 km/h.³³
- **P_FLIGHTALTITUDE:** Parámetro que representa la altitud de vuelo. Al no disponerse de datos de altitud de vuelo para el modelo de 5 plazas, se supondrá de 2000m, pues la altitud máxima de vuelo del modelo de dos plazas es de 3000m.³⁴

³³ Bacchini & Cestino (2018)

³⁴ Phenix (2016)

- ***P_TAKEOFFTIME*** y ***P_LANDINGTIME***: Tiempo que tarda el aerotaxi en realizar un despegue y un aterrizaje, respectivamente. Para ambos el valor es de 30 segundos.³⁵
- ***v_altitude***: Variable que indica la altitud del aerotaxi.
- ***v_latitude***, ***v_longitude*** y ***v_route***: No se emplearán en el modelo pero se pueden utilizar si se desea instanciar el modelo en una red. Las dos primeras representan la posición del aerotaxi (coordenadas de latitud y longitud, respectivamente) mientras que la tercera almacenaría la ruta del trayecto.

Finalmente, existen también tres elementos más alojados dentro del agente del modelo “Aerotaxi”. Se trata de la figura de presentación (en este caso se ha optado por su similitud por un helicóptero), el elemento de referencia al Main (agente “Estación”), por el cual se indica a Java que el agente es de jerarquía inferior y el elemento “connections”, que permite a todos los agentes comunicarse entre sí.

5.2.2. Agente Viajero

Para éste agente del modelo se ha obtenido el siguiente diagrama de estados:

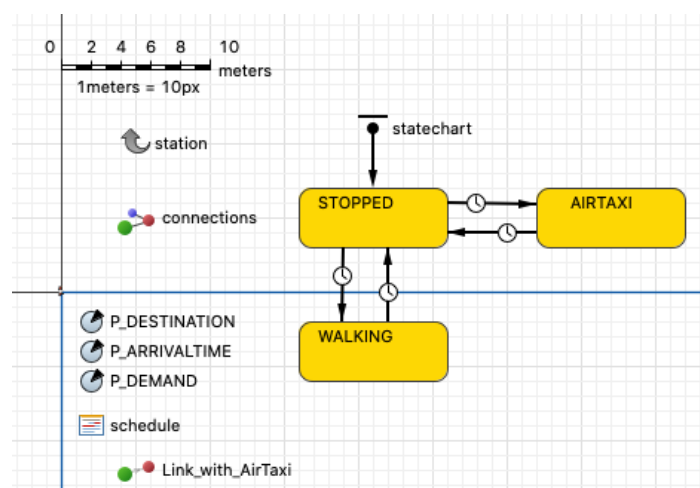


Figura 25: Vista principal del agente Viajero. Fuente: Elaboración propia en Anylogic

³⁵ Bacchini & Cestino (2018)

El diagrama de estados funciona de manera sencilla, pues pasa de *STOPPED* a *WALKING* en cuanto el agente comienza a moverse, y viceversa cuando el agente se detiene. Además, cuando el viajero entra dentro del vehículo, pasa al estado *AIRTAXI*, que abandonará al salir del mismo.

Además. Se ha definido dentro del agente viajero un horario (*schedule*) que contiene la proporción de llegadas de pasajeros en función de la franja horaria.

Repeat schedule weekly:

Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Start	End	Value
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6:30 AM	10:30 AM	60.0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10:30 AM	5:00 PM	30.0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5:00 PM	9:00 PM	60.0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9:00 PM	6:30 AM	10.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1:30 AM	8:30 AM	5.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1:30 PM	6:30 PM	30.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	6:30 PM	1:30 AM	20.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1:30 AM	2:30 AM	1.0

Figura 26: Horario de afluencia de llegada de viajeros. La columna "Value" muestra las llegadas por hora según la franja horaria. Fuente: Elaboración propia en Anylogic a partir de la demanda calculada en Plaza (2019)³⁶

5.2.3. Agente Batería

Este agente ha sido declarado en Anylogic como recurso, por lo que se podrá hacer uso de él dentro de diagramas de flujo de recursos. Además, en la declaración del banco de recursos correspondiente se ha especificado que se trata de un recurso portátil, por lo que no puede desplazarse por sí mismo y requiere de un segundo agente al efecto.

³⁶ Plaza (2019)

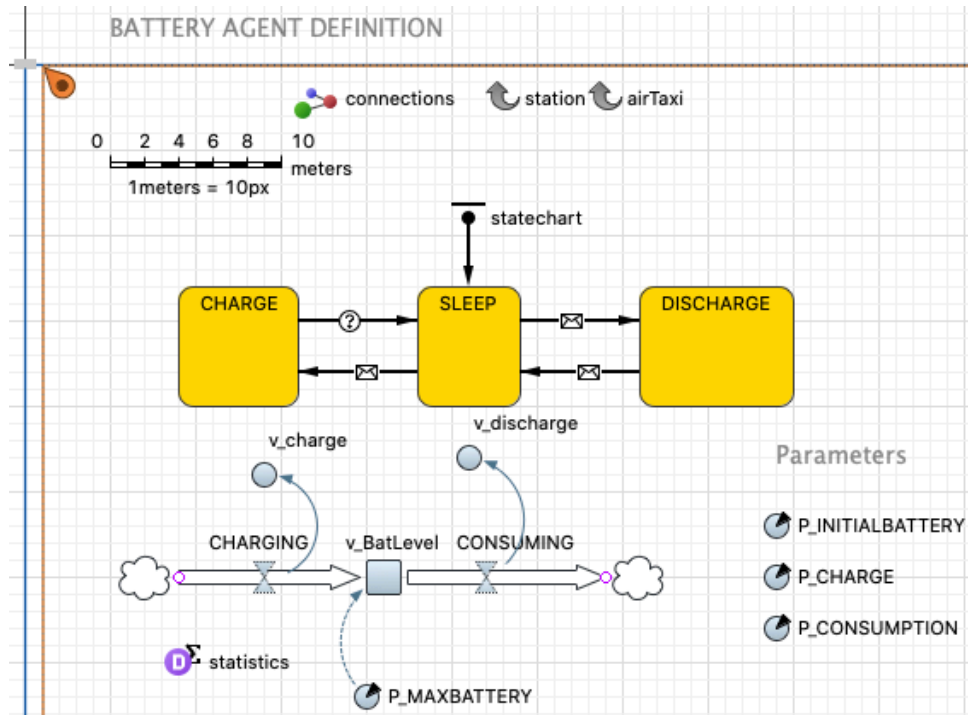


Figura 27: Vista principal del agente Batería. Fuente: Elaboración propia en Anylogic

- **SLEEP (Reposo):** Es el estado inicial. En este estado la batería no se encuentra ni cargando ni consumiendo y el valor de v_charge y $v_discharge$ es igual a cero. Las transiciones a los estados *CHARGE* o *DISCHARGE* tienen lugar cuando el agente recibe los mensajes “Charge” o “Discharge”, respectivamente.
- **CHARGE:** Cuando la batería se encuentra en este estado, está en el almacén siendo recargada. Nada más entrar en este estado, el valor de v_charge pasa a ser igual al parámetro P_CHARGE . El agente sale de este estado y vuelve al estado de reposo en cuanto el valor de la batería (depósito $v_BatLevel$) es igual al valor máximo, definido por $P_MAXBATTERY$. A la salida de este estado el valor de v_charge pasa a ser de nuevo cero.
- **DISCHARGE:** La batería entra a este estado en cuanto el aerotaxi despegue. Al entrar en este estado, el valor de $v_discharge$ pasa a ser igual a $P_CONS_TAKEOFF$. Al finalizar el aerotaxi la maniobra de despegue el valor de $v_discharge$ será igual al parámetro P_CONS_CRUISE . Finalmente, durante el aterrizaje del aerotaxi el valor de $v_discharge$ pasará a ser igual al parámetro $P_CONS_LANDING$. El agente sale de este estado en cuanto el vehículo toca

tierra (en cuanto el aerotaxi sale del modo landing, éste manda un mensaje al agente batería con los caracteres “Sleep”).

Las variables y parámetros del agente son los siguientes:

- ***P_MAXBATTERY***: Parámetro que representa la capacidad energética de la batería. En el caso del Lilium de cinco puertas éste es de 38000³⁷.
- ***P_INITIALBATTERY***: Parámetro que representa el nivel de batería inicial cada vez que se crea un agente batería.
- ***P_CHARGE***: Parámetro que representa el valor del flujo de carga de la batería cuando ésta se encuentra recargando.
- ***P_CONS_TAKEOFF*, *P_CONS_LANDING* Y *P_CONS_CRUISE***: Se ha optado por aproximar el consumo de la batería por tres fases. Este parámetro representa el flujo de descarga de la batería durante el despegue, aterrizaje y modo de vuelo crucero, respectivamente.
- ***v_charge***: Variable que toma el valor 0 cuando la batería no se encuentre en el estado de carga. Cuando la batería se encuentre cargando pasa a valer el flujo de carga.
- ***v_discharge***: Variable. Al igual que en el caso anterior, toma el valor cero si la batería no está siendo utilizada en vuelo. En caso contrario pasa a valer el flujo de descarga de la fase de vuelo correspondiente.
- ***v_BatLevel***: Variable dinámica que representa el valor del nivel de la batería en cualquier momento. En este caso el valor de esta variable se ha modelado como un depósito con un flujo de entrada y otro de salida, bajo el paradigma de los sistemas dinámicos.

³⁷ Bacchini & Cestino (2018)

5.2.4. Agente Helipuerto

Por último, se detalla el funcionamiento del agente del modelo “Helipuerto”. En este caso se trata de un recurso estático, pues su posición espacial es fija, por lo que habrá que definirlo como tal al crear el banco de recursos correspondiente. El diagrama es muy sencillo y pasa de *IDLE* a *BUSY* en cuanto el recurso es capturado por el aerotaxi, realizando la transición inversa en cuanto se libera el aerotaxi.

Además, el agente helipuerto dispone de un nivel interno ubicado a la misma altura que el nivel *SkyLevel* del agente principal. Con los siguientes elementos de descripción del espacio (ver 4.2.4.)

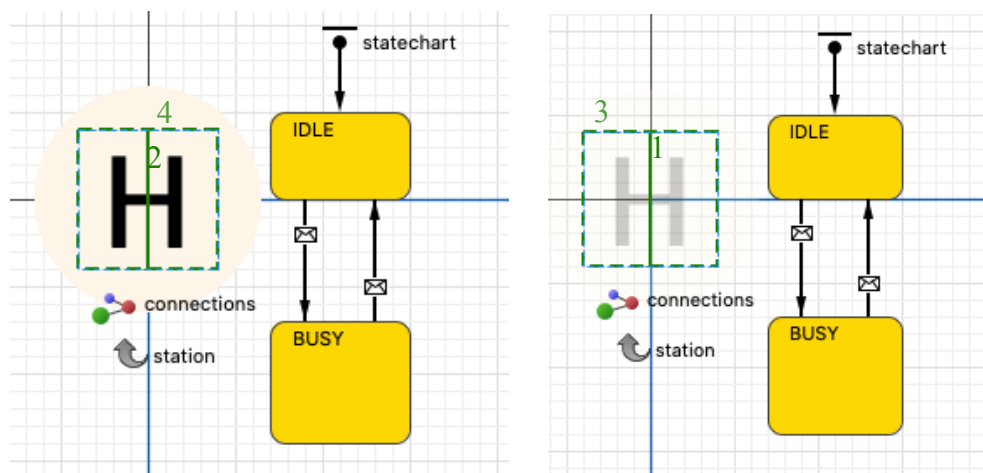


Figura 28: Vista principal del agente Viajero en los niveles PortLevel (izda.) y SkyLevel(Dcha.). Fuente:

Elaboración propia en Anylogic

- *tl_sky (1)* y *tl_land (2)*: Líneas de destino por la que los aerotaxis efectúan el cambio de nivel.
- *a_sky (3)* y *a_land (4)*: Describen dónde esperan los aerotaxis en ambos niveles para simular las maniobras de despegue y aterrizaje.

5.3. Sistemas Dinámicos: Diagramas de Flujos y Depósitos

5.3.1. Nivel de la batería

El funcionamiento del diagrama de flujos y depósitos para el nivel de la batería queda recogido en el apartado 4.2.3. *Agente Batería*.

5.3.2. Costes de la estación

Los costes de la estación se han incluido modelados bajo el paradigma de los sistemas dinámicos, tal y como se propuso en la concepción del modelo conceptual. El diagrama de flujos y depósitos que modela esta casuística se encuentra dentro del agente principal del modelo “Estación” (*Main*) y su estructura queda recogida a continuación.

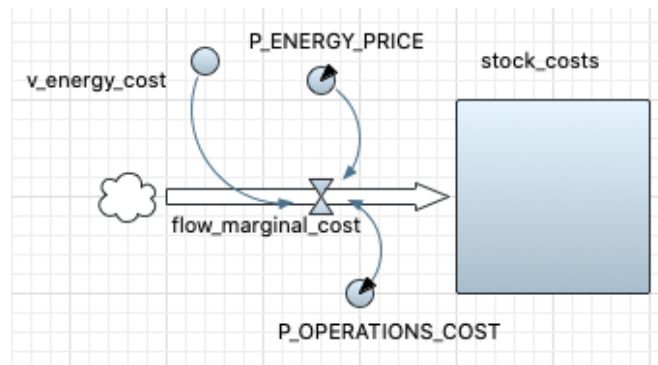


Figura 29 : Diagrama de flujos y depósitos que modela la acumulación de costes en la estación. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

5.4. Diagramas de Flujo de Eventos Discretos

5.4.1. Llegadas y salidas de aerotaxis a la estación.

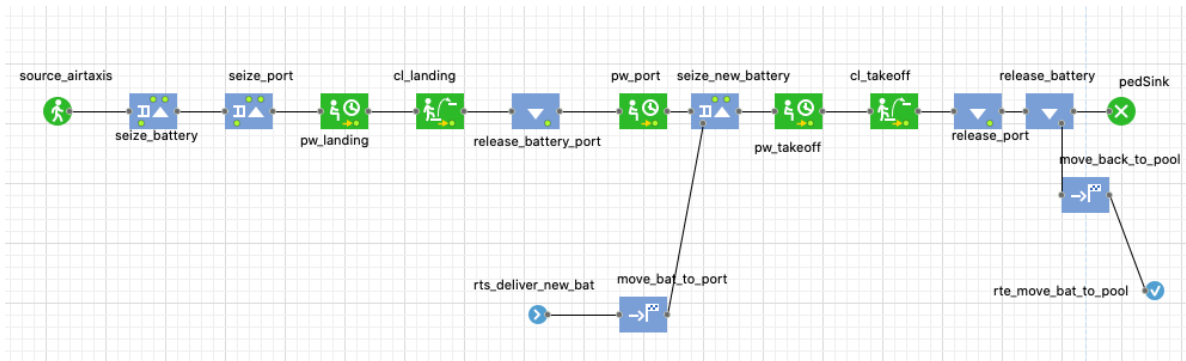


Figura 30: Diagrama de flujo de eventos discretos que modela las llegadas y salidas de aerotaxis. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

El funcionamiento del diagrama es el siguiente:

- **Source_airtaxis:** En este bloque se generan los aerotaxis que entran al sistema. Pueden ser generados de dos maneras, bien mediante llamadas al método `inject()`, bien mediante una agenda de llegadas. Si se incorporase este modelo a un modelo de la red se deberá suprimir este bloque ya que los aerotaxis vendrán de otras estaciones.
- **Seize_battery:** Los aerotaxis que llegan al sistema deben llegar con una batería. En este bloque se pide una batería al banco de recursos auxiliar `rPool_Bat_Taxis`, que contiene baterías con un nivel de carga aleatorio entre 200 y 10000 kWh. En la incorporación del modelo al diseño de una red, deberá suprimirse este bloque, ya que los aerotaxis tomarán las baterías en su estación de origen y las depositarán en la estación de salida. El programador debe asegurarse de que este bloque sea siempre capaz de entregar una batería al aerotaxi que entra, bien utilizando un tamaño muy grande para el banco de recursos o bien reemplazando las baterías dinámicamente, de lo contrario se formaría una cola a la entrada del bloque que no se correspondería con la realidad, pues los aerotaxis ya llegan con una batería.

- ***Seize_port***: En este bloque los aerotaxis mandan una solicitud a la estación para poder utilizar uno de los puertos disponibles del pozo de recursos *rPool_Ports*. En caso de no haber ningún puerto disponible, los aerotaxis sobrevolarán la estación. Resulta de gran utilidad la estructura del agente “Seize” en Anylogic, que presenta una cola embebida que gestiona por sí sola los aerotaxis que no han podido recibir un helipuerto asignado. Esto permitirá acceder en tiempo real al número de taxis que están esperando a una pista en un momento dado.

- ***Pw_landing***: Los aerotaxis esperan en la posición indicada en este bloque durante un tiempo igual al tiempo de maniobra de aterrizaje (*P_LANDINGTIME*). De esta manera se aproxima la maniobra de aterrizaje de manera sencilla. Puesto que el número de puertos y su ubicación se pueden alterar entre ejecuciones del modelo, resulta necesario que éste bloque tome un valor dinámico para la posición donde debe esperar el aerotaxi. Esto se consigue pasando como ubicación la siguiente expresión, que además requiere de una máscara de bits para aclarar a java que el elemento donde debe buscar es un agente de tipo *HeliPort*:

```
((HeliPort)ped.resourceUnitOfPool(rPool_Ports)).a_sky
```

 Este método permite acceder al agente en concreto que ha sido previamente asignado al aerotaxi en el bloque *Seize_port*, lo cual es necesario dado que el área de despegue y aterrizaje están definidas dentro de este agente.

- ***Cl_landing***: Tras esperar el tiempo de aterrizaje este bloque el aerotaxi efectúa un cambio de nivel, desde el nivel del espacio aéreo *SkyLevel* hasta el nivel del puerto *PortLevel*. Las líneas de entrada y salida de los niveles de origen y destino se pasarán de la misma manera que en el bloque anterior, empleando:

```
((HeliPort)ped.resourceUnitOfPool(rPool_Ports)).tl_sky
```

```
y ((HeliPort)ped.resourceUnitOfPool(rPool_Ports)).tl_port
```

 respectivamente.

- ***Release_battery_port***: Los aerotaxis deberán depositar su batería descargada en el puerto una vez han tocado tierra. Esta batería será movida al pozo de recursos *rPool_Batteries_Station*, por lo que se debe indicar en las acciones de salida del bloque la siguiente instrucción:

```
rPool_Batteries_Station.set_capacity(rPool_Batteries_Station.capacity+1);
```

- **Pw_port**: Este segundo bloque de retardo representa la espera en pista del aerotaxi al (los) pasajero(s). En este caso el retardo no finaliza tras pasar ningún tiempo específico, sino que espera a una orden enviada desde el diagrama flujo de procesos de viajeros *FC_Travellers*, o bien a una orden directa desde uno de los botones accionadores diseñados al efecto.
- **Seize_new_battery**: Se pide una batería cargada al pozo de recursos *rPool_Batteries_Station_c*, en caso de no disponerse de ninguna, el aerotaxi esperará en el sitio hasta que se reciba. El bloque hace uso, además, de una subrutina de preparación de recursos mediante el proceso **Move_bat_to_port**, gracias al cual la batería nueva es transportada desde el almacén hasta la pista correspondiente.
- **Pw_takeoff**: De manera similar al bloque de retardo que simula el aterrizaje, los aerotaxis esperan en este bloque un tiempo igual al tiempo de maniobra de despegue *P_TAKEOFFTIME*. Al entrar en este bloque, se envía una orden al flujo *FC_Travellers* para liberar de la cola al siguiente viajero, mediante el método: `FC_Travellers.pw_top.freeAll();`
- **Cl_takeoff**: Aquí se efectúa un nuevo cambio de nivel siguiendo la lógica inversa a la del bloque **cl_landing**, es decir, se pasa del nivel *PortLevel* al nivel *SkyLevel*.
- **Release_port**: Una vez el aerotaxi ha despegado, se da la orden de pista despejada a la estación, con lo que incrementa en 1 la capacidad del pozo *rPool_Ports* y el puerto puede ser utilizado por el siguiente aerotaxi en la cola.
- **Release_battery**: Por último, los aerotaxis dejan su batería en el pozo auxiliar *rPool_Bat_Taxis*, antes de salir del sistema. Este movimiento se controla también con la subrutina **Move_back_to_pool**.
- **PedSink**: Finalmente, los aerotaxis que salen de la estación son eliminados del sistema en este bloque.

5.4.2. Flujo de viajeros en el interior de la estación.

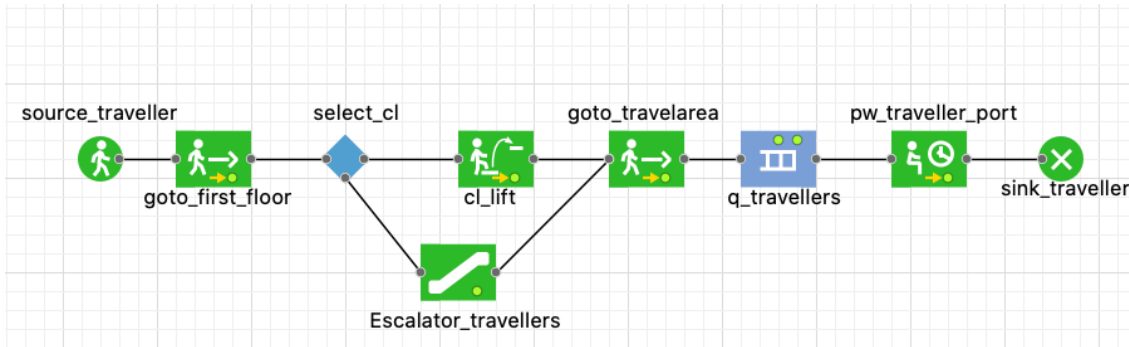


Figura 31 : Diagrama de flujo de eventos discretos que modela el flujo de viajeros en la estación. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

El diagrama basa su funcionamiento en la siguiente lógica:

- **Source_traveller:** Aquí se da la inyección de pasajeros en la estación. Los pasajeros entran por la entrada principal (*tl_entrance*) Se ha programado la inyección para albergar la posibilidad de la entrada de varios viajeros en grupo, pues la capacidad de los aerotaxis es de cinco personas. Las llegadas pueden ser controladas, al igual que sucedía con las llegadas de aerotaxis, bien por un calendario o bien mediante el método `source_traveller_inject()`;
- **Goto_first_floor:** Se trata de un bloque intermedio que obliga a los viajeros a adentrarse hasta el hall de la estación antes de dirigirse al piso superior. Se ha decidido incluir este bloque para evitar situaciones en las que los viajeros subían al nivel superior por el exterior del edificio.
- **Select_cl:** Bloque de decisión en el que los pasajeros pueden decidir subir al piso superior bien por las escaleras mecánicas (probabilidad=0,8) o bien por el ascensor (probabilidad=0,2) .
- **Cl_Escalator:** Bloque que modela la subida de pasajeros al nivel superior haciendo uso de las escaleras mecánicas. La lógica interna del cambio de nivel de

- este bloque no necesita ser descrita ya que está programada de manera nativa en Anylogic.
- ***Cl_Lift***: En este bloque los pasajeros suben al piso superior mediante los ascensores. Se han definido como líneas de entrada y salida al al bloque, respectivamente las líneas de destino *tl_liftdown_top/ tl_liftup_top* (ascensor norte) y *tl_liftdown_bot/ tl_liftup_bot* (ascensor sur).
 - ***Goto_travelarea***: Los pasajeros se dirigirán al área *a_wait*, situada justo antes de los accesos a los helipuertos, donde deben esperar a ser asignados a un aerotaxi por el bloque de cola *Q_travellers*.
 - ***Q_travellers***: Este bloque crea un objeto de cola en Anylogic. Los viajeros que entran a este bloque guardan una cola en la que esperan a la llegada de un aerotaxi (son liberados uno a uno siguiendo una política FIFO desde *FC_Arrivals*, mediante una llamada del método `Q_travellers.removeFirst()`). El objeto bloque de cola resulta muy útil ya que presenta una serie de métodos y variables embebidos internamente que permiten acceder fácilmente a estadísticas como el tiempo de espera de cada pasajero, el tiempo máximo de espera dado en cada iteración del experimento o el tiempo medio de espera de los pasajeros, lo que permite emplear el modelo para cuantificar la calidad del servicio, que es uno de los objetivos de simulación perseguidos, así como basar las decisiones de diseño en la optimización de la calidad y visualizar este indicador durante el transcurso de la simulación animada.
 - ***Pw_traveller_port***: Por último, los viajeros esperan a la entrada de la pista a que el aerotaxi aterrice y realice el cambio de batería necesario. Esta espera tiene lugar en el área *a_port_X*, donde X es el puerto asignado al viajero por la cola.
 - ***Sink_traveller***: Una vez montados en el aerotaxi, los viajeros son eliminados del sistema.

5.4.3. Flujo de transeúntes en el interior de la estación

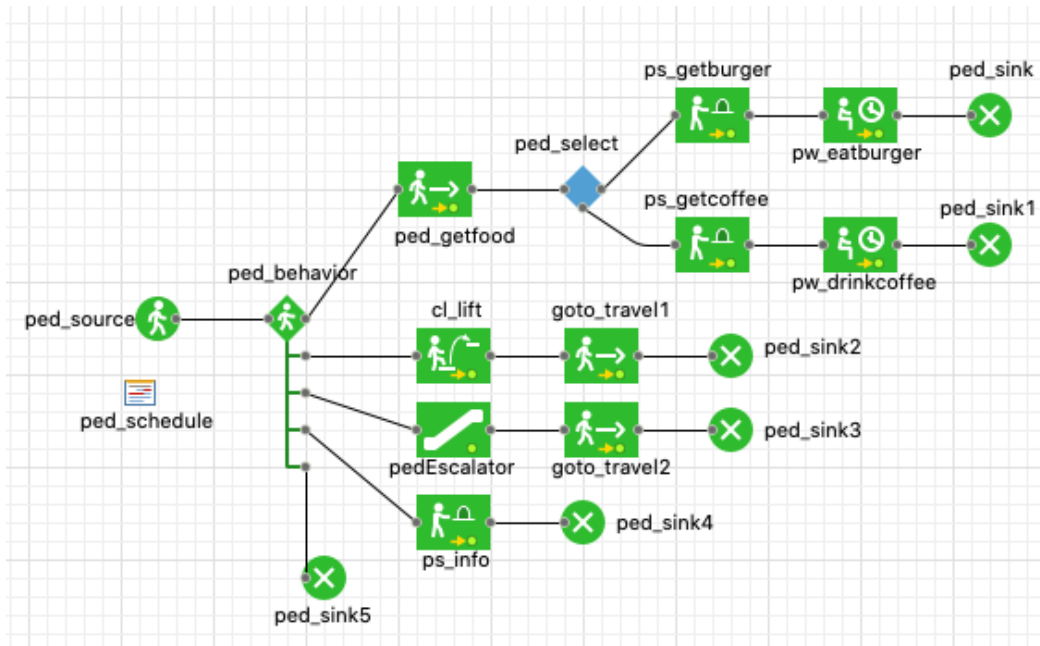


Figura 32: Diagrama de flujo de eventos discretos que modela el flujo de transeúntes en la estación. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

Puesto que los transeúntes no presentan interacción alguna con los aspectos funcionales del modelo salvo para hacer caja en los establecimientos, se describirá el diagrama de una manera más general que en los casos anteriores y sin entrar en detalle explícito de cada bloque.

- **Ped_source:** Bloque de inyección de viajeros al sistema. Las llegadas siguen distribuciones de probabilidad según el horario de afluencia definido en el objeto *ped_schedule*.
- **Ped_Behavior:** Se asigna aleatoriamente a cada transeúnte y con igual probabilidad uno de los siguientes destinos, a saber, ir ala zona de restauración, subir al piso superior (por ejemplo, a acompañar a un viajero) bien por las escaleras (*pedEscalator*) o por el ascensor (*cl_lift*) o dirigirse al mostrador de información. Del mismo modo, los transeúntes que se dirijan a la zona de restauración (*ped_getfood*) entran al bloque *ped_select*, donde se decide de nuevo si van al restaurante o bien a la cafetería.

- **Ps_XXX**: En estos bloques se indica al sistema que los visitantes deben guardar una cola antes de ser atendidos, ya sea en el restaurante (**ps_getburger**), en la cafetería (**ps_getcoffee**) o en el mostrador de información (**ps_info**). En los dos primeros casos, además, los transeúntes esperan un tiempo que representa su disfrute del menú (**pw_eatburger** y **pw_drinkcoffee**, respectivamente).
- **Goto_XXX**: Bloques intermedios para dirigir a los transeúntes al área de espera de los viajeros (**goto_travel1**, **goto_travel2**) o al área de información (**goto_info**).
- **Ped_sinkX**: Salida de pasajeros del sistema (destrucción del agente).

5.4.4. Flujo de baterías

El flujo de baterías está integrado dentro del flujo de aerotaxis *FC_Arrivals* mediante las subrutinas de preparación de recursos (ver 4.4.1.), que desplazan las baterías desde los helipuertos al almacén y viceversa. La lógica detrás de la gestión de baterías cargadas y descargadas queda recogida en el apartado 4.6.1. *Gestión de los Bancos de Recursos*.

5.5. Integración Conjunta del Modelo y Relación con los Objetivos de Modelado.

Una vez presentadas las partes que afectan al comportamiento de cada agente dentro del sistema, se procederán a explicar las estrategias de modelado seguidas para recrear el resto de casuísticas y eventos que se dan en la estación, y que resultan esenciales para el cumplimiento de los objetivos de modelado. Todos estos elementos residen junto a todos lo anteriormente descritos dentro del agente principal “Estación” *Main*.

5.5.1. Gestión de los Bancos de Recursos.

Cada conjunto de recursos (baterías y helipuertos) ha sido definido siguiendo una estrategia distinta en la programación de los bancos de recursos correspondientes.

- **Gestión de helipuertos:** La gestión y asignación de helipuertos se hace por completo desde el banco *rPool_Ports*, que declara los puertos al comienzo de la simulación como un recurso estático (esto es, no pueden moverse, ser movidos ni ser destruídos). Este pozo de recursos interactúa con los bloques *seize_port* y *release_port*, definidos en el flujo *FC_Arrivals* (ver 4.5.1) y permite al sistema bloquear los puertos mientras se está haciendo uso de ellos y desbloquearlos al finalizar el despegue de cada aerotaxi. Además, la capacidad de este banco de recursos (esto es, el número de puertos del que dispone el sistema) se ha asignado de manera dinámica y es igual al número de nodos atractores presentes en el área *anode_ports*. El número de atractores será igual a la variable de decisión del modelo *dv_numports* y la ubicación de los mismos se puede variar. Esta manera de definir la cantidad y ubicación de los puertos resulta muy ventajosa para los diseñadores de la estación que pudieran hacer uso del modelo para reforzar el proceso de diseño, ya que tan sólo tendrán que desplazar los nodos atractores hacia la ubicación deseada y el banco de recursos colocará automáticamente un recurso “Helipuerto” en cada uno de estos nodos, por lo que pueden experimentar con diferentes configuraciones de la estación.

- **Gestión de las baterías:** La gestión de baterías se realiza desde tres bancos de recursos diferentes. El primero es un banco auxiliar imaginario *r_Pool_Taxis* que representa las baterías que están siendo utilizadas por aerotaxis en servicio en ese momento. Se ha optado por esta estrategia puesto que la programación para inyectar los aerotaxis en el sistema con una batería previamente acoplada resultaría extremadamente laboriosa, ya que requeriría de la modificación del código fuente creado por Anylogic al compilar el modelo. Además, de esta manera, es posible simular la llegada de baterías con distinto nivel de carga, pues cada aerotaxi llega desde una ubicación que puede ser más o menos cercana por lo que llegará con la batería con un mayor o menor nivel de carga. Para recrear esta casuística se ha optado por incluir como acción cada vez que el aerotaxi demanda una batería (bloque *seize_battery*) una llamada al método `unit.v_BatLevel=uniform(3000, 15000)`. De esta manera, la batería auxiliar creada llegará con un valor de carga aleatorio entre 3000 y 15.000 kWh.

En segundo lugar se han definido los dos pozos de recursos *rPool_Batteries_Station* (para baterías descargadas) y *rPool_Batteries_Station_c* (para las baterías cargadas). La lógica es que, al llegar las baterías descargadas al pozo correspondiente, éste envía el mensaje al agente para efectuar el cambio de estado al estado de carga. De este modo, las baterías se van cargando automáticamente en el sistema. Una vez finaliza la recarga, la unidad de batería en cuestión ejecuta la acción de ser trasladada al banco de baterías cargadas (esto se realiza dentro del propio agente, ver 4.3.3.). Además, en la definición de ambos pozos de recursos se ha optado por añadir las baterías presentes a la población *battery<n>*, que representa el número de agentes “Batería” que habitan en el agente principal “Estación”. De esta manera, se puede acceder al ejecutar la simulación al estado y variables de cada batería individual dentro del sistema y en tiempo real. Finalmente, la capacidad del banco de baterías cargadas se asigna dinámicamente y es igual a la variable de decisión d_b (*dv_numbat*, en el modelo). Al igual que sucedía con los puertos, este diseño permite al usuario elegir el número de baterías del que dispone la estación, acorde con los objetivos de modelado.

5.5.2. Alineación con los objetivos de modelado.

Se ha venido haciendo hincapié a lo largo de todo este documento en la importancia de los objetivos de modelado a la hora de diseñar el sistema. El diseño de modelos de simulación debe responder antes a la pregunta *¿Para qué?* que a la pregunta *¿Por qué?*. Un modelo que represente correctamente un sistema pero que no disponga de herramientas para extraer información valiosa relativa a los objetivos de modelado será siempre un modelo más débil que uno que sí sea capaz de entregar esta información.

La definición de variables de decisión y variables de diseño en busca de la optimización, la estructura programática basada en agentes del modelo en busca de la escalabilidad e implementabilidad y la inclusión de métodos estadísticos y de visualización de datos dirigidos a extraer la información de los objetivos de modelado y poder destinarla a los equipos de diseño y dirección de proyectos, constituyen los elementos que aportan el verdadero valor añadido del modelo.

Se ha optado por la inclusión de gráficos dentro del agente principal del modelo (agente “Estación”) que permiten visualizar en tiempo real los valores de algunas de las variables más importantes del sistema, y que quedan documentados a continuación.

OBJETIVO 1: VIABILIDAD TÉCNICA

Como se ha visto en el *apartado 1.5*, la viabilidad técnica pasa por determinar el valor de las dos variables de decisión $dv_{numpistas}$ y dv_{numbat} . Por ello, ambas variables se han definido en el agente principal. Además, se han añadido al agente principal gráficas en las que se puede observar tanto el valor del número de baterías cargadas como descargadas de la estación.

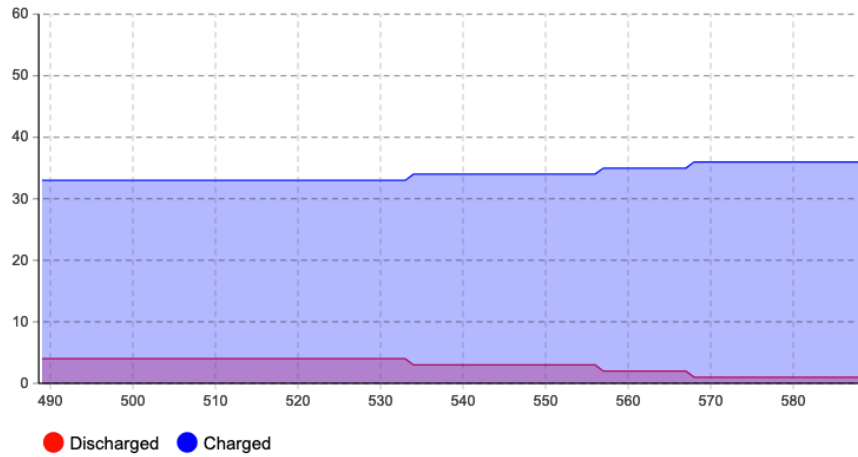


Figura 33: Gráfica de evolución temporal de baterías cargadas(azul) frente a descargadas en un instante dado de la simulación. Se puede observar cómo la fuente de baterías cargadas aumenta en el instante en que se cargan las vacías. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

OBJETIVO 2: CALIDAD

Como se ha visto en el apartado 1.5. la calidad del servicio se define de dos maneras. En primer lugar, mediante el indicador K_{QT} , que mide la calidad en función del tiempo de espera de los viajeros dentro de la estación. En segundo lugar mediante el indicador K_{QA} , que mide la calidad en función de la espera que deben realizar los viajeros que llegan en aerotaxi hasta que su vehículo puede aterrizar en la estación. Ambos indicadores se han definido como variables de salida de experimentos de simulación para el agente *Main*. Además, se han incorporado al agente principal las gráficas en tiempo real de los tiempos de espera de pasajeros y aerotaxis, así como la del número de aerotaxis a la espera de un puerto despejado.

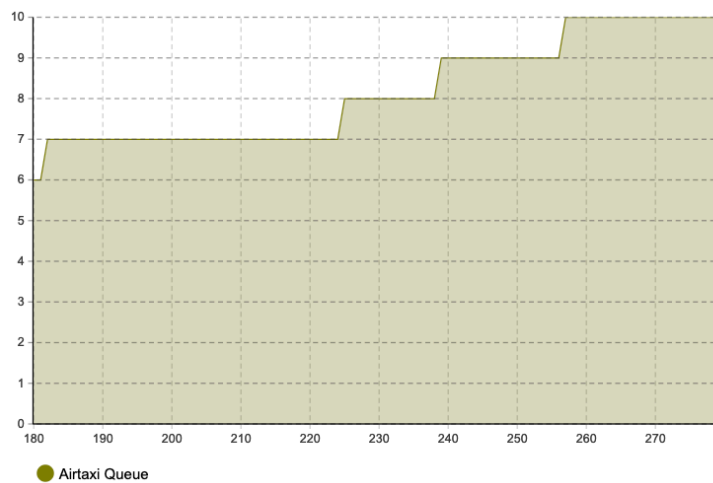


Figura 34: Gráfica que muestra los aerotaxis en cola en un instante dado. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

OBJETIVO 3: COSTE

Para satisfacer los objetivos relativos al coste de operación del edificio se ha añadido al agente principal el diagrama de flujos y depósitos que muestra el coste de la estación acumulado desde el inicio de la simulación (C_S). (ver 4.4.2.).

También se ha implementado una gráfica que muestra el consumo energético dedicado a la recarga de baterías en tiempo real de la estación. Esta gráfica también reside dentro del agente principal “Estación”.

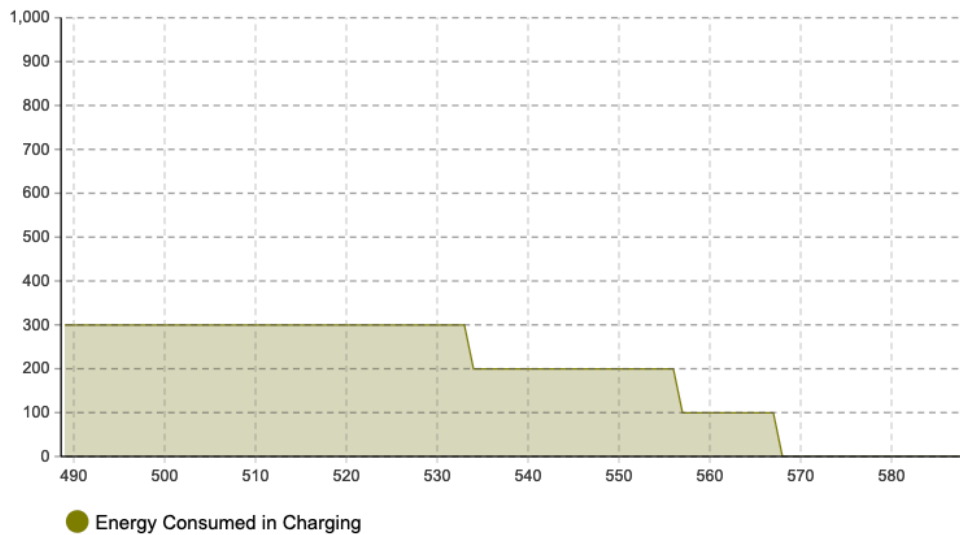


Figura 35 : Gráfica del consumo eléctrico de la estación para el mismo instante que en la figura 33. Se puede apreciar cómo el consumo eléctrico disminuye a medida que las baterías van finalizando su carga. Fuente:

Elaboración propia en Anylogic.

Se profundizará en las aplicaciones de estas gráficas en el capítulo siguiente.

5.6. Conclusiones del Capítulo 5.

Se ha presentado el modelo construido en Anylogic y se ha documentado en detalle su funcionamiento. Además, se ha explicado la elección de distintas estrategias dirigidas a incorporar al modelo diferentes funcionalidades, como la posibilidad de variar el número y disposición espacial de helipuertos o las funciones de visualización de datos en tiempo real.

Se pueden resumir las fortalezas principales del modelo en tres:

- El modelo cumple con los objetivos de modelado y responde a preguntas estratégicas dentro de la gestión de proyectos.
- El modelo es robusto frente a cambios de parámetros de diseño, en primer lugar dado que todos los valores de los que hace uso están referidos a parámetros creados al efecto y editables por el usuario. En segundo lugar puesto que la configuración de los puertos es personalizable gráficamente. Esto supone una ventaja ya que se puede utilizar para estudiar estaciones con configuraciones distintas.
- El modelo es escalable e instanciable ya que todas las entidades y recursos del mismo han sido modeladas como agentes. Esto implica que se puede instanciar dentro de un modelo de red de aerotaxis creado en el exterior (habría tan sólo que pedirle al modelo de red un valor para los parámetros) y que se pueden editar fácilmente las características de los agentes del modelo si, por ejemplo, se decide utilizar unas baterías con un factor de carga distinto o se opta por un modelo de aerotaxi distinto.

A continuación, en el siguiente capítulo, se documentarán los resultados de experimentos realizados para probar el modelo y se procederá a exponer las conclusiones del Proyecto.

6. Aplicación del Modelo

En este punto se dispone ya de un modelo operativo que es capaz de responder a las preguntas planteadas y aportar los indicadores definidos en los objetivos de modelado.

A continuación se realizarán tres experimentos para probar la efectividad del modelo a la hora de arrojar resultados que ayuden a satisfacer los objetivos de modelado.

El Experimento I consiste en la comparación de simulaciones utilizando un valor distinto para la variable de decisión d_p (número de helipuertos), utilizando los resultados obtenidos para seleccionar el valor óptimo de la variable.

El Experimento II es similar al anterior, con la salvedad de que en este caso se pretende calcular el valor óptimo de la variable de decisión d_b (número de baterías recargadas iniciales) en función de los resultados obtenidos para distintos valores.

Por último, en el Experimento III se utilizarán los valores optimizados hallados en los dos experimentos anteriores (d_p^* y d_b^*) para calcular el valor de los indicadores de calidad (K_{QA} y K_{QV}) y coste (C_D) definidos al principio de este Proyecto.

Para todos los experimentos se han utilizado los siguientes parámetros:

- Coste de operación de la estación: $P_OPERATIONS_COST = \frac{0,042\text{€}}{s}$
- Tiempo de despegue de un aerotaxi: $P_TAKEOFF_TIME = 30\ s$
- Tiempo de aterrizaje de un aerotaxi: $P_LANDING_TIME = 30\ s$
- Precio de la energía: $P_ENERGY_PRICE = 0,00006\ \text{€/Wh}$
- Velocidad de carga de una batería: $P_CHARGE = 10,55\ W$
- Capacidad de una batería: $P_BATTERY_CAPACITY = 19.000\ Wh$

6.1. Resultados de los Experimentos de Simulación

Para realizar este estudio se ha indicado en los bloques de inyección de pasajeros y aerotaxis que éstos deben llegar según un determinado horario. El horario se basa en la demanda calculada en Plaza (2019) para la ciudad de Madrid. En concreto se basa en los trayectos que tienen como origen o destino la estación de Atocha. La demanda se muestra a continuación.

Trayecto	Flujo máximo de pasajeros (4h)	H actividad máx.
LLEGADAS		
Alcobendas - Atocha	257	6:30 – 10:30, 17:00-21:00
Las Rozas - Atocha	131	6:30 – 10:30, 17:00-21:00
Boadilla del Monte - Atocha	62	6:30 – 10:30, 17:00-21:00
TOTAL LLEGADAS	450	
SALIDAS		
Atocha - Las Rozas	112	6:30 – 10:30, 17:00-21:00
Atocha – Boadilla del Monte	38	6:30 – 10:30, 17:00-21:00
Atocha - Alcobendas	270	6:30 – 10:30, 17:00-21:00
TOTAL SALIDAS	420	

Tabla 2: Flujo máximo de llegadas y salidas a la estación de Atocha. Fuente: Elaboración propia a partir de las demandas calculadas en Plaza (2019).

Con estos datos se construirán en Anylogic dos horarios, uno para las llegadas de aerotaxis (basado en el flujo de llegadas totales), que se insertará dentro del horario creado en el agente “Aerotaxi” y otro para las llegadas de viajeros a la estación (basado en el flujo de salidas totales). Puesto que los datos son para días laborales. Se utilizarán como datos para el fin de semana y para las horas no puntas la siguiente aproximación:

- 60% del flujo máximo de L a V de 10:30 a 21:00.
- 20% del flujo máximo de L a V de 21:00 a 10:30.
- 30% del flujo de los días laborales para cualquier franja del fin de semana.

De esta manera, el horario diseñado en Anylogic presenta la siguiente forma para las llegadas (aerotaxis):

Repeat schedule weekly:

Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Start	End	Value
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6:30 AM	10:30 AM	112.5
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10:30 AM	5:00 PM	67.5
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5:00 PM	9:00 PM	112.5
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9:00 PM	6:30 AM	22.5
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6:30 AM	10:30 AM	34.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10:30 AM	5:00 PM	20.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5:00 PM	9:00 PM	34.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9:00 PM	6:30 AM	5

Figura 35: Horario de llegadas por hora de aerotaxis. Fuente: Elaboración propia en Anylogic a partir de los datos de Plaza (2019).

Y para la llegada de viajeros:

Repeat schedule weekly:

Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Start	End	Value
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6:30 AM	10:30 AM	105.0
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10:30 AM	5:00 PM	63
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5:00 PM	9:00 PM	105
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9:00 PM	6:30 AM	21
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6:30 AM	10:30 AM	31.5
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10:30 AM	5:00 PM	19
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5:00 PM	9:00 PM	31.5
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9:00 PM	6:30 AM	6

Figura 35: Horario de llegadas por hora de viajeros. Fuente: Elaboración propia en Anylogic a partir de los datos de Plaza (2019).

6.1.1. Experimento I: Aplicación del Modelo para Calcular el Número Óptimo de Helipuertos

Una vez se han implementado estos horarios, se procederá a ejecutar el modelo utilizando como variable de decisión el número de puertos. Para ello, Anylogic permite la creación de experimentos de simulación basados en variaciones de variables de decisión. En estos experimentos, se escoge un rango de valores entre los que probar la variable de decisión y un valor para los incrementos entre iteraciones del experimento. En este caso se han escogido entre tres y diez puertos en incrementos de uno, por lo que

el experimento iterará ocho veces. Además, se ha escogido la opción de replicar la simulación cuantas veces sea necesario hasta obtener un nivel de confianza para las variables objetivo de al menos 20%. Estas variables son el tiempo de espera de cada aerotaxi (t_A), en la cola (es decir, a la espera de serle asignada una pista) y el tiempo de espera de un viajero (t_V), en la cola, es decir, en la estación esperando a su turno para viajar. Se establecerán por tanto, como salidas del experimento, tanto la evolución temporal de las variables t_A , t_V , como sus valores medios (\bar{T}_A , \bar{T}_V), calculados en base a la totalidad de aerotaxis y viajeros que entran en el sistema

Los otros parámetros y variables de decisión se pueden variar también para el experimento, pero se mantienen fijos entre réplicas. Se ha escogido un número de baterías iniciales cargadas lo suficientemente alto como para evitar congestiones de aerotaxis en pista a la espera de una batería recargada (cien, en concreto), ya que el objeto de estudio es el número de helipuertos y no el número de baterías iniciales.³⁸

EXPERIMENTO I: Determinación del número óptimo de Helipuertos (tiempo de simulación: 16.000 segundos)

Nº de puertos	T máximo en cola		T medio en cola (\bar{T}_A) (\bar{T}_V)		Desviación típica		Nivel de confianza	
	Aerotaxis	Viajeros	A	V	A	V	A	V
5	> 2000 s	>2000 s	798 s	>1000	-	-	-	-
6	2084 s	2097 s	762 s	865 s	675 s	666 s	63%	62 %
7	328 s	465 s	73 s	153 s	77 s	89 s	6,9%	8 %
8	274 s	367 s	31,2 s	113,7 s	49 s	67 s	4,4%	5,9 %
9	60,8 s	180 s	3,1 s	71,5 s	10,7 s	40,8 s	0,95 %	3,6 %
10	75,8 s	185 s	2,81 s	67 s	10,1 s	27 s	0,87 %	3 %

Tabla 3: Experimento 1: Tiempos máximos en la cola para aerotaxis y viajeros. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del experimento muestran un claro punto de inflexión cuando el número de puertos es igual o menor que seis. En estos casos, el sistema no es lo

³⁸ El experimento se ha configurado para detener la simulación al cabo de 16.000 segundos y comenzar a las 6:20 a.m. de un Lunes. Por lo que durará hasta las 11:57 a.m. (cubriendo así la totalidad de la franja horaria de demanda punta, que va de 6:30 a.m. a 10:30 a.m.).

suficientemente ágil como para igualar a la demanda y se forma un embotellamiento al mantenerse la situación de forma sostenida durante las horas de demanda punta.

Para los experimentos con siete o más puertos, observamos también una sustanciosa mejora entre utilizar diez o nueve puertos e instalar siete u ocho. Atendiendo a las gráficas presentadas a continuación se podría concluir que, instalando nueve o más helipuertos, se tiene un sistema fluido, que se adapta perfectamente a los cambios de demanda, y donde la gran mayoría del tiempo los aerotaxis no deben esperar a recibir una asignación de pista. En los casos de siete u ocho puertos, se tiene un sistema que, siendo también bastante ágil, se ve resentido durante las horas puntas, llegando los aerotaxis a tener que esperar hasta más de cinco minutos a recibir pista en los casos más extremos.

Antes de analizar los resultados, se debe tener en consideración el tiempo de simulación escogido. Para todas las iteraciones del experimento se ha escogido como hora de inicio del experimento las 6:20 a.m. de un día laboral. Esto implica que, pasados diez minutos, se entra en la primera franja horaria de demanda punta, de la que se sale cuatro horas más tarde. El experimento transcurre en tiempo real tomando una muestra cada segundo. Además, se ha optado por detener la simulación una hora después del final de la primera hora punta (11:30). En términos de la simulación, esto conlleva que la duración total del experimento es de 16.000 segundos, y que la primera hora punta comienza a partir del segundo 600, y dura hasta el segundo 15.000.

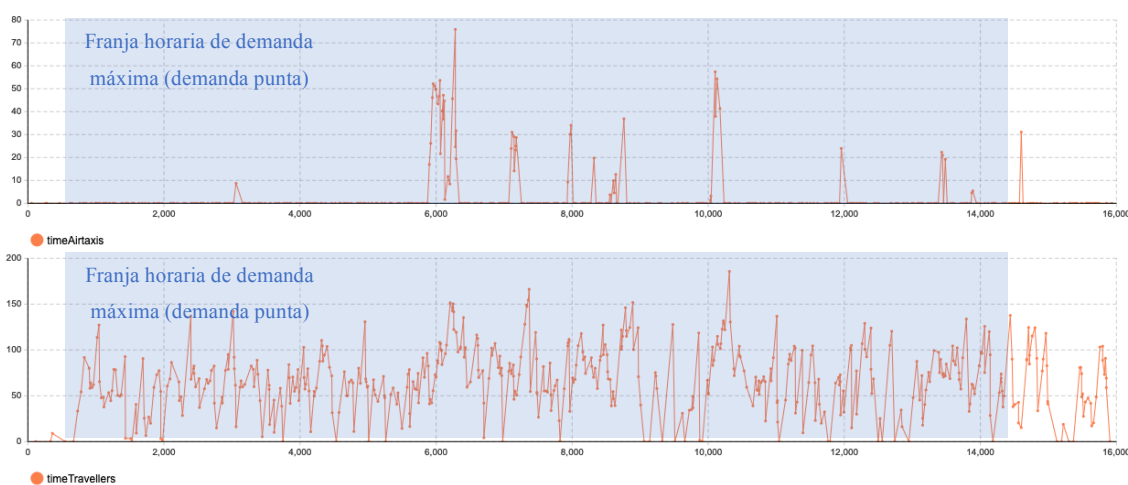


Figura 36: Experimento 1: Tiempo (en segundos) en la cola para aerotaxis (arriba) y viajeros (abajo) para una estación con 10 helipuertos. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.



Figura 37: Experimento 1: Tiempo (en segundos) en la cola para aerotaxis (arriba) y viajeros (abajo) para nueve helipuertos. El eje horizontal representa el tiempo transcurrido desde el comienzo de la simulación. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

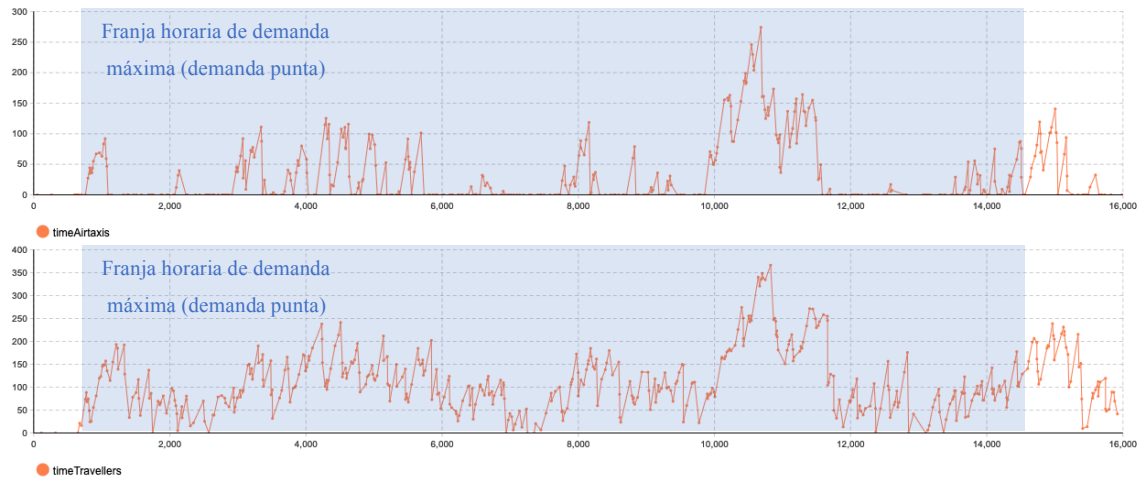


Figura 38: Experimento 1: Tiempo (en segundos) en la cola para aerotaxis (arriba) y viajeros (abajo) para una estación con ocho helipuertos. El eje horizontal representa el tiempo en segundos transcurrido desde el comienzo de la simulación (6:20 a.m.). Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

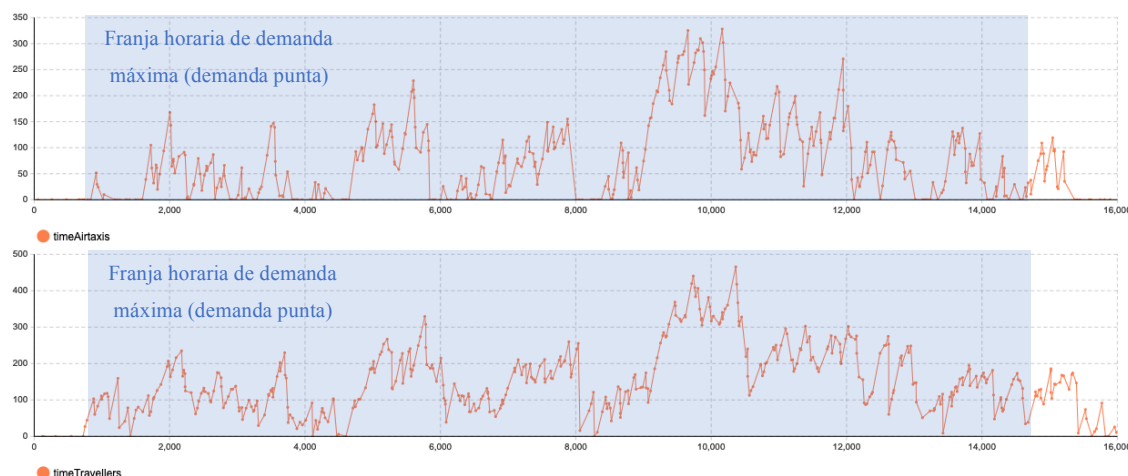


Figura 39: Experimento 1: Tiempo (en segundos) en la cola para aerotaxis (arriba) y viajeros (abajo) para una estación con 7 helipuertos. El eje horizontal representa el tiempo en segundos transcurrido desde el comienzo de la simulación (6:20 a.m.). Fuente: Elaboración propia en Anylogic..

Estos cuatro pares de gráficas aportan claridad a la hora de visualizar en qué medida la elección del número de helipuertos afecta a los indicadores de calidad de la estación y al funcionamiento de la misma. Se observa como, a medida que se aumentan los puertos, disminuye el valor medio de ambos indicadores, al igual que se reduce en gran manera el área bajo la curva. También se puede comprobar cómo, para un valor elevado del número de puertos (nueve o diez), el tiempo medio de espera tan reducido se debe a la ausencia de aerotaxis en la cola en prácticamente cualquier instante de la simulación, ya que el tiempo de espera es cero para la mayoría de las muestras. Además, en la *Figura 39* se observa cómo, para siete helipuertos, la mayoría de aerotaxis sí tienen que esperar un tiempo en cola. Esto aumenta las probabilidades de producirse embotellamientos si se hubiera subestimado la demanda o si se diese una situación excepcional en la que llegase una gran cantidad de aerotaxis y pocos viajeros a la estación.

Además, se muestra la gráfica de tiempos de espera para seis helipuertos. En ella se observa cómo el sistema se satura a partir del segundo 7.800 (8:30 a.m.) aproximadamente, llevando a los vehículos siguientes a permanecer por periodos de incluso más de media hora sobrevolando la estación. También se han realizado simulaciones con cuatro y cinco helipuertos, sin embargo, se ha optado por no incluirlas, pues el resultado es evidentemente mucho peor que para seis helipuertos y el sistema alcanza la saturación prácticamente al comienzo del experimento.

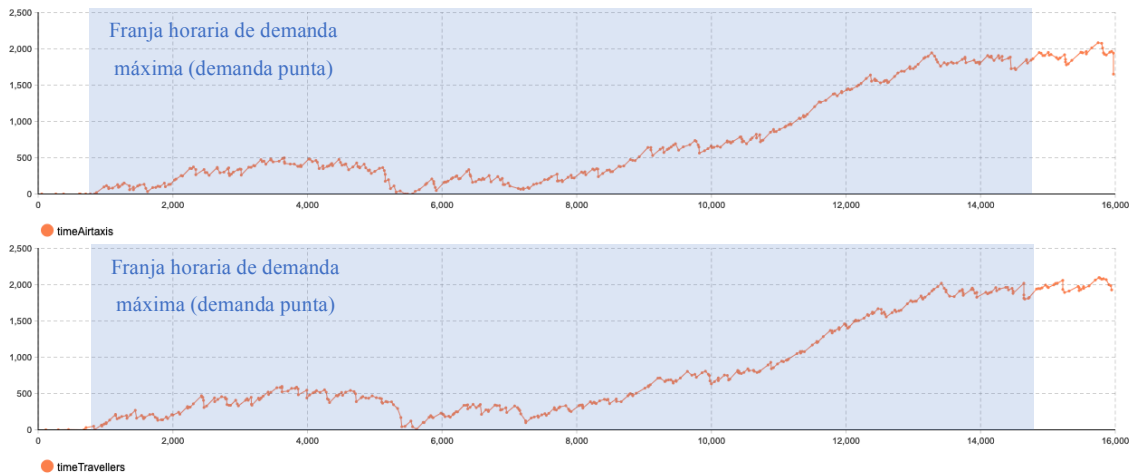


Figura 40: Experimento 1: Tiempo máximo (en segundos) en la cola para aerotaxis (arriba) y viajeros (abajo) para una estación con 9 helipuertos, en la que se puede observar cómo el sistema se satura hacia la segunda mitad de la franja de demanda punta. El eje horizontal representa el tiempo en segundos transcurrido desde el comienzo de la simulación (6:20 a.m.). Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

Con estos datos, se pasa a tomar una decisión acerca del número de helipuertos a instalar. El número de óptimo se sitúa claramente por encima de seis, pues los embotellamientos en el sistema son una contingencia a evitar. Se debe decidir, por tanto, si apostar por diseños más fluidos (nueve y diez puertos) pero en los que no se suele hacer uso de todos los puertos salvo en contadas ocasiones (se observan en las Figuras 36 y 37 cómo la mayor parte del tiempo los aerotaxis no tienen que esperar a la cola, pues su tiempo de espera es cero) o bien por diseños más optimizados, que sacrifican algo de calidad de servicio (aunque siguen dentro de los márgenes deseados) pero requieren de una menor inversión en terreno e infraestructura.

Si atendemos a las gráficas, no se observa una mejora sustancial de los tiempos de espera entre nueve y diez helipuertos. Además, como ya se ha resaltado, los tiempos de espera para siete helipuertos, a pesar de no ser especialmente elevados ya que arrojan un valor de K_{QA} (tiempo de espera medio de aerotaxis) de 73 segundos, sí quedan registrados como mayores de cero para la mayoría de los casos, lo cual implica que sería frecuente encontrar aerotaxis a la espera de una pista. Los tiempos de espera para ocho helipuertos, sin embargo, se asemejan mucho más a lo que se desearía para un proyecto de estas características, pues aproximadamente la mitad de los vehículos no deben esperar

a la cola y, a pesar de haber un momento de mayor actividad hacia la segunda mitad de la hora punta, el sistema es capaz de volver a operar de manera normal rápidamente.

Teniendo consideración estos factores, se debe tomar una decisión acerca del número de helipuertos a instalar. El número óptimo de helipuertos (d_p^*) atiende a la siguiente relación:

$$d_p^* = d_p (\bar{T}_A, \bar{T}_V, Dem_A, Dem_V, P_i, C_{P+}) \quad [2.1]$$

Es decir, el número óptimo de helipuertos depende de los tiempos medios de espera, de la tasa de llegadas de aerotaxis (Dem_A) y viajeros (Dem_V) y del coste de añadir un nuevo helipuerto (C_{P+}). Con esto en consideración, se determina que la estación opera en su punto óptimo cuando dispone de ocho helipuertos, aunque se aconseja tener en cuenta la opción de añadir un helipuerto más si se persiguiese un sistema especialmente ágil y robusto ante cambios repentinos de la demanda, a pesar del exceso de inversión inicial que ello pudiera conllevar.

$$d_p^* = 8$$

6.1.2. Experimento II: Determinación del Número Óptimo de Baterías.

De manera similar al procedimiento empleado para determinar el número de helipuertos, se puede estudiar el número óptimo de baterías cargadas (d_b) de las que debe disponer la estación. Entra en juego en gran medida el factor de carga de las baterías, pues cuanto más rápido éstas se recarguen, antes estarán disponibles para los aerotaxis que llegan a la estación. Se tienen datos de recargas completas en 70 minutos y recargas parciales (suficientes para vuelos de hasta una hora) en 30 minutos³⁹ para las baterías del Liliium (que tienen una energía aproximada de 38 kWh⁴⁰). Puesto que la duración máxima de los vuelos dentro de la red estudiada en Madrid es de poco más de diez minutos, se puede optar por recargar las baterías hasta la mitad. Es decir, se utilizará como valor de

³⁹ Zart (2020)

⁴⁰ Bacchini & Cestino (2019)

carga máxima 19 kWh. En este caso, puesto que la recarga completa dura 30 minutos, se debe utilizar un valor para la capacidad de las baterías de recarga de las baterías proporcional. Además, puesto que las unidad de tiempo asociada al sistema dinámico que gestiona la recarga de la batería es el segundo, el valor elegido para la capacidad de recarga debe ser el que se muestra en la Ecuación 2.1:

$$P_{CHARGE} = \frac{19.000 \text{ Wh}}{0,5 * 3.600} = 10,55 \text{ W [2.2]}^{41}$$

Esta vez, el experimento se llevará a cabo teniendo en cuenta los resultados del experimento anterior, es decir, se utilizará ocho como número de helipuertos. El procedimiento será similar al descrito para el Experimento I, con la excepción de que se variará entre iteraciones de la simulación en incrementos de diez baterías.

EXPERIMENTO 2: Determinación del número óptimo de Baterías

Nº inicial de baterías cargadas (d_i)	Nº mínimo de baterías cargadas durante la simulación (Nb_{min})	Nº medio de baterías cargadas a partir del tiempo de establecimiento ($t = 3000 \text{ s}$)	Desviación Típica
50	0	N.A.	N.A.
60	3	16,14	4.62
70	13	26,14	4.62
80	23	36,14	4.62
90	33	46,14	4.62
100	43	56,14	4.62

Tabla 4: Experimento II: Número de baterías cargadas disponibles. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se observa cómo, dada la naturaleza del problema, los resultados para niveles entre 60 y 100 baterías iniciales son idénticos en forma, con la salvedad de que hay una diferencia de diez entre todos sus valores, por lo que las gráficas muestran la misma curva desplazada en diez unidades hacia abajo cada vez que se disminuye en diez

⁴¹ No debe confundirse este valor (energía transferida a la batería cada segundo) con la potencia consumida por la batería, que, en estas condiciones, sería $P_{CONS} = \frac{19kWh}{0,5h} = 38 \text{ kW}$

el número inicial de baterías. Además, también resulta útil tener en cuenta el tiempo de establecimiento de la curva para calcular el valor medio, por lo que los datos del experimento han sido editados retirando las primeras 3000 muestras (cada replicación alcanza las 16.000 muestras, una por segundo). De esta manera, los resultados obtenidos en la *Tabla 4* son para la media calculada a partir del tiempo de establecimiento.

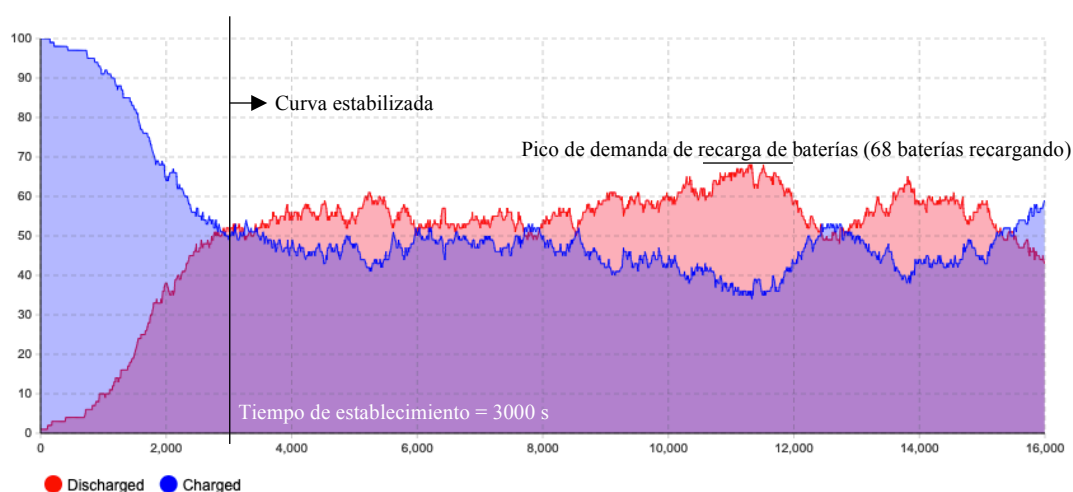


Figura 41: Evolución temporal del número de baterías en la estación para 100 baterías iniciales. En azul se representan las baterías recargadas y en rojo las que se hallan aún en proceso de carga. El eje horizontal representa el tiempo en segundos desde el comienzo de la simulación (6:20 a.m.). Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

Se observa cómo, en el punto de mayor demanda, se están recargando 68 baterías al mismo tiempo. Las gráficas para los experimentos que utilizan entre 60 y 90 baterías no se muestran dada la similitud ya comentada que existe con la de la *Figura 41*.

A continuación se muestra la gráfica obtenida para una simulación con 50 baterías, en la que se puede observar cómo el experimento ha sido programado para detenerse si en cualquier momento se agota la reserva de baterías recargadas, lo cual detendría el servicio y se considera inaceptable para el Proyecto.

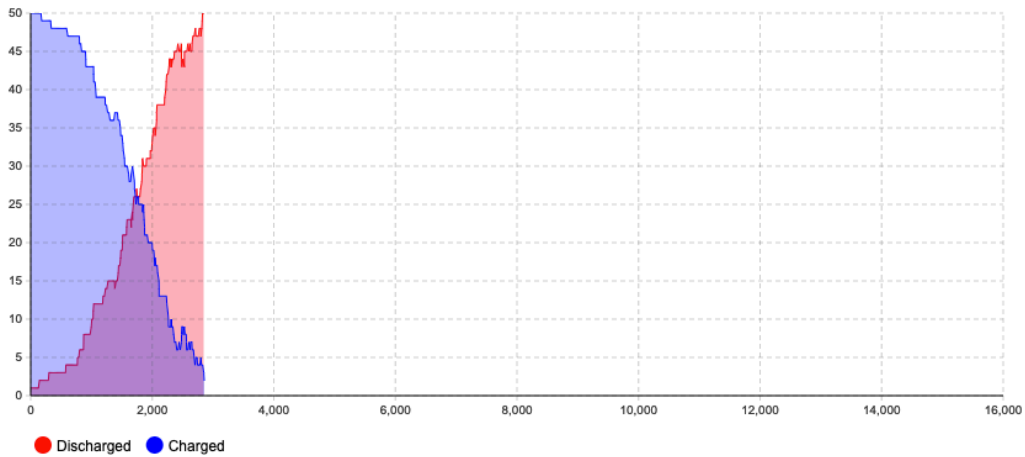


Figura 42: Evolución temporal del número de baterías para 50 baterías iniciales. En azul se representan las baterías recargadas y en rojo las que están aún en proceso de carga. El eje horizontal representa el tiempo en segundos desde el comienzo de la simulación (6:20 a.m.). Se observa cómo el experimento se detiene al vaciarse la reserva de baterías cargadas. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

El número óptimo de baterías, al igual que en el experimento anterior, se debe decidir teniendo en consideración una variación repentina de la demanda. Es por ello que se ha decidido disponer de un margen de seguridad (ms_b) de al menos 30 baterías. De esta manera, el número óptimo de baterías obedece a la siguiente relación:

$$d_b^* = d_b(ms_b, Nb_{min}, P_i) \quad [2.3]^{42}$$

En concreto, el valor de d_b^* es aquel valor de d_b en el que se cumple que:

$$d_b^* = d_b: Nb_{min} = ms_b \quad [2.4]$$

Es decir, el valor óptimo es aquel en el que el número mínimo de baterías en la estación es igual al margen de seguridad. Con estas consideraciones, se tiene como resultado del experimento que:

$$d_b^* = 87$$

Además, puesto que el número máximo de baterías recargadas al mismo tiempo (Nb_{max}) para $d_b^* = 87$ es de 68, se puede obtener un valor para la instalación de potencia total requerida para poder recargar todas las baterías que demanda el sistema al mismo

⁴² El argumento P_i hace referencia a los parámetros del experimento, definidos al principio del *Capítulo 5*.

tiempo. Se debería estudiar la posibilidad de establecer un límite de baterías recargando para disminuir el valor de potencia requerida, sin embargo, el modelo no incorpora la posibilidad de seleccionar este valor límite. La potencia total necesaria a instalar (P_{INS}) atendiendo a los resultados del experimento sería de:

$$P_{INS} = N_{b_{max}} * P_B = 68 * 38 \text{ kW} = 2584 \text{ kW} \quad [2.5]$$

Es decir, si se desean recargar todas las baterías se deberá instalar un transformador y conectar la estación a la red de alta tensión.

6.1.3. Aplicación del Modelo Optimizado para el Cálculo de Indicadores

Puesto que se tiene un valor óptimo de las variables de diseño del problema, se procede a aplicar el modelo incorporando estos nuevos hallazgos para así poder determinar los indicadores de calidad y coste del modelo.

En el apartado de calidad los indicadores se calculan basándose en los tiempos de espera medios aportados por el Experimento I, cuyos resultados conviene recordar:

- Tiempo medio de espera de un aerotaxi: $\bar{T}_A = 31,2s$
- Tiempo medio de espera de un viajero: $\bar{T}_V = 113,7 s$

De esta manera, los indicadores de calidad para el modelo con las variables de decisión optimizadas son los siguientes:

- Indicador de calidad para la espera de aterrizaje de un aerotaxi:

$$K_{QA} = \frac{\bar{T}_A}{T_{A_{IDEAL}}} = \frac{\bar{T}_A}{60s} \quad [2.6] \quad \mathbf{K_{QA} = 1,92}$$

- Indicador de calidad para la espera de un viajero en la estación :

$$K_{QV} = \frac{\bar{T}_V}{T_{V_{IDEAL}}} = \frac{\bar{T}_V}{120s} \quad [2.7] \quad \mathbf{K_{QV} = 1,06}$$

Se obtienen unos valores para ambos indicadores de calidad por encima de uno, lo que significa que en ambos apartados el servicio ofrecido es de mayor calidad que el elegido como servicio de referencia en el Capítulo 1 ($T_{A_{IDEAL}} = 1 \text{ min}$, $T_{V_{IDEAL}} = 2 \text{ min}$).

Además, para una mejor visualización y cuantificación de la calidad del servicio, se muestran a continuación los histogramas de distribución de los tiempos de espera de aerotaxis y viajeros para el modelo optimizado (*Figuras 43 y 44*). En ellos se observa cómo la mayoría de aerotaxis reciben un servicio inmediato. También se observa cómo los tiempos de espera para los viajeros están mucho más distribuidos.

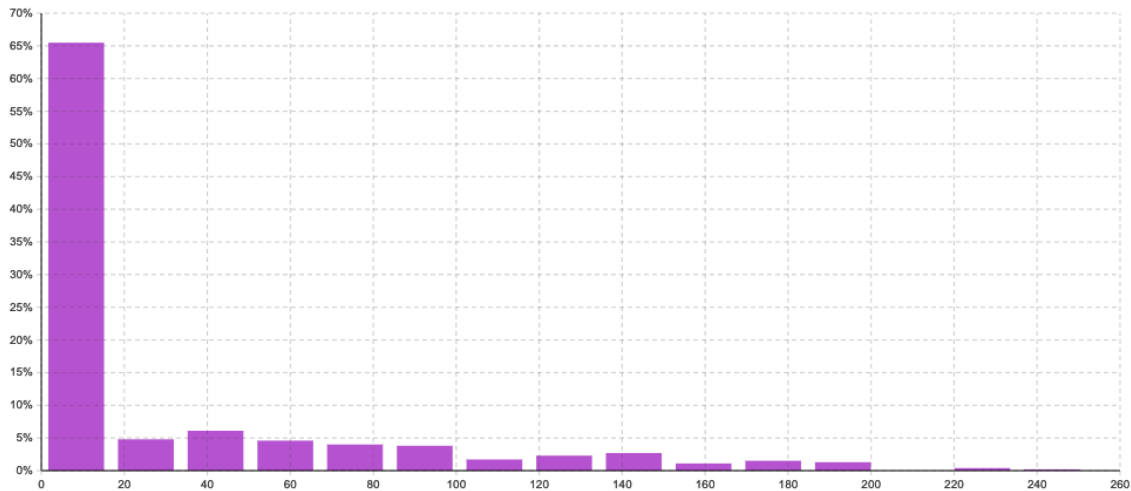


Figura 43: Histograma que muestra la distribución de tiempos de espera de los aerotaxis para la simulación con el modelo optimizado. Se observa cómo la mayoría de aerotaxis (alrededor del 65%) esperan un tiempo entre 0 y 20 segundos. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

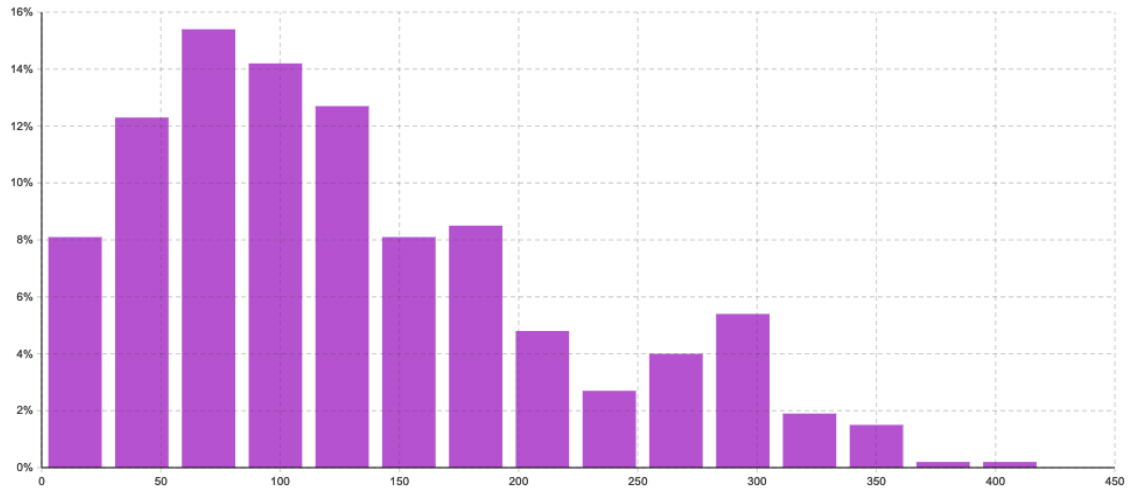


Figura 44: Histograma que muestra la distribución de tiempos de espera de los viajeros para la simulación con el modelo optimizado. Se observa cómo, alrededor del 75% de viajeros esperan un tiempo entre 0 y 200 segundos. Mientras que cerca del 50% de viajeros realizan esperas por debajo de 100 segundos. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

COSTE

Se desea determinar el coste de operación de la estación para un día laboral (C_D). Para ello, como se ha visto en 4.3. (donde se exponían las casuísticas modeladas utilizando la estrategia de sistemas dinámicos), se dispone del siguiente diagrama de flujos y depósitos (se muestran el conceptual y el diseñado en la herramienta):

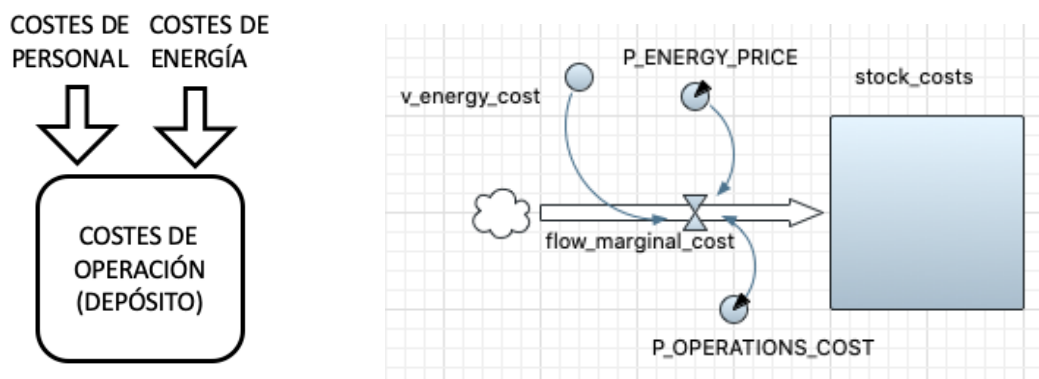


Figura 45: Diagrama de flujos y depósitos conceptual (izda.) y diseñado en Anylogic (dcha.) que modelan la acumulación de costes en la estación. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

Es decir, el coste se calcula en el modelo de manera dinámica mediante un depósito en el que dos flujos (uno que aporta el coste energético y otro el coste de operación y mantenimiento) inyectan cada segundo un determinado valor. Este valor es fijo para los costes de operación y mantenimiento (representado por el parámetro de coste de operación C_{OP} ⁴³), y variable para el coste eléctrico (C_E ⁴⁴), que depende en todo momento de la energía que se está empleando en recargar cada batería (e_{carga}) de la siguiente manera:

$$C_E = \sum_{N_b} e_{carga} \quad [2.8]$$

$$\text{donde} \quad e_{carga} = \frac{d}{dt} E_{CARGA} \quad [2.9]$$

Donde E_{CARGA} es el nivel de carga de la batería en cualquier momento (el valor que hay almacenado en su depósito, que en el modelo recibe el nombre $v_BatLevel$)

De esta forma, el cálculo del coste diario (C_D) se puede formular mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d}{dt} C_D = p_E * \frac{d}{dt} E_{CARGA} + C_{OP} = C_E + C_{OP} \quad [2.10]$$

Donde p_E es el precio de la energía.

Al estar el coste regido por una ecuación diferencial, resulta conveniente el diseño del modelo, que permite realizar el cálculo en tiempo real simulando el proceso dinámico que realmente tiene lugar. Para calcular el coste durante la ejecución del modelo se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Precio por kWh de energía: $P_E(kWh) = 0,06€ \text{ por kWh}$ ⁴⁵

⁴³ En el modelo este parámetro recibe el nombre $P_OPERATIONS_COST$

⁴⁴ En el modelo esta variable recibe el nombre v_energy_cost

⁴⁵ Se ha aproximado la tarifa de alta tensión (que no es pública) de la siguiente manera. Se ha obtenido la correspondiente tarifa de media tensión (tarifa óptima para empresas) publicada por endesa. Esta tarifa es de 0,085 €/kWh para instalaciones menores de 450 kW si se aplica el descuento del 15% permanente por

- Del valor anterior, y sabiendo que la energía que fluye a una batería es por segundo y vale $E_{CARGA} = 10,55Wh$, se puede obtener el precio por segundo de recarga, que, como es lógico, coincide con el precio por Wh de energía.

$$P_E = \frac{P_E(kWh) * E_{CARGA}}{e_{CARGA} * 1800 s} = \frac{0,06 \frac{\text{€}}{kWh} * 19kWh}{10,55 * 1800 s} = 6 * 10^{-5} \frac{\text{€}}{Wh} \quad [2.11]$$

- Coste de operación y mantenimiento aproximado de la estación:
 - $3000 \frac{\text{€}}{\text{día}} \text{ personal}^{46} \rightarrow 0,035 \frac{\text{€}}{s}$
 - $500 \frac{\text{€}}{\text{día}} \text{ consumibles} \rightarrow 0,006 \frac{\text{€}}{s}$
 - $100 \frac{\text{€}}{\text{día}} \text{ mantenimiento} \rightarrow 0,001 \frac{\text{€}}{s}$
 - $Coste total = 0,042 \frac{\text{€}}{s}$
- Duración de la simulación: 1 día laboral.

Con estos parámetros, se procede a ejecutar la simulación. En este caso, la única variable de salida es el coste total acumulado durante un día de simulación (C_D), que en el modelo recibe el nombre de *stock_costs* (Figura 46). Tras la finalización del experimento se observa el siguiente diagrama de flujos y depósitos.

tarifa plana (Endesa, 2020). Se ha aproximado la tarifa de alta tensión como un 70% de este valor obteniéndose un valor aproximado de 0,06 €/kWh.

⁴⁶ Calculado en base a siete trabajadores presentes de media en la estación (que abre las 24h) con un salario medio bruto de 16€/hora.

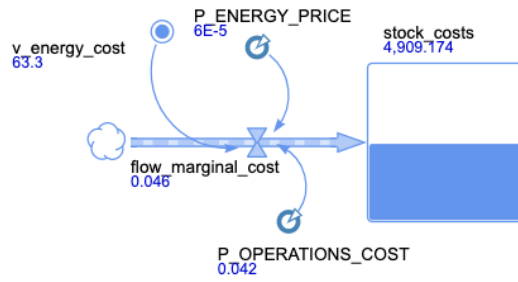


Figura 46: Estado del diagrama de flujos y depósitos al final de la simulación. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

Se obtiene, por tanto que el valor arrojado por el modelo para el coste durante un día de simulación es de 4909,17 €. La Figura 46 muestra el estado final del depósito de costes al cabo de un día entero de simulación.

$$C_D = 4909,17€$$

6.2. Conclusiones del Capítulo 5

Se ha obtenido un modelo optimizado para el cual se han calculado los indicadores de calidad, así como el coste diario de operación de la estación. La obtención del modelo optimizado, así como el cálculo de indicadores de calidad y coste se han realizado mediante tres experimentos de simulación. Los resultados se recogen en la siguiente tabla:

RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS				
Experimento	Objetivo	Resultados		
I	Número óptimo de helipuertos	$d_p = 8$ helipuertos		
II	Número óptimo de baterías iniciales	$d_b = 87$ baterías iniciales		
III	Valor de indicadores objetivo	$K_{QA}=1,92$	$K_{QI}=1,06$	$C_D = 4909,17€$

Tabla 5: Resumen de resultados de los experimentos. Fuente: Elaboración propia.

Se ha observado también cómo el modelo genera problemas durante la franja de horaria punta si el valor del número de helipuertos instalados o el número de baterías iniciales es demasiado bajo. Este resultado era esperable y resalta la necesidad de realizar un estudio de viabilidad técnica antes de llevar a cabo un proyecto físico.

A la vista de los resultados, se ha visto cómo el modelo tiene aplicación real y útil tanto en el ámbito de diseño como en el de gestión de proyectos, siendo capaz de cumplir con los objetivos de modelado establecidos al comienzo de este Proyecto.

7. Conclusiones y Desarrollos Futuros

En el presente proyecto se ha obtenido un modelo de simulación de una estación de aerotaxis que es capaz de cumplir correctamente con los objetivos de modelado. El proceso de construcción de este modelo parte, desde su concepción hasta su implementación, pasando por la creación de un modelo conceptual intermedio cuyo diseño ha servido de cimentación para elaborar el modelo de simulación final.

ALIGERAR

Se ha dado respuesta a preguntas relativas a la viabilidad técnica, el coste y la calidad del servicio ofrecido.

En este capítulo, se elaborarán una serie de conclusiones que se han derivado durante las fases de diseño y aplicación, se realizarán propuestas para desarrollos futuros del Proyecto y se mencionarán las limitaciones halladas en el mismo durante el modelado y simulación.

7.1. Conclusiones del Proyecto

El modelo de la estación de aerotaxis planteado es capaz de satisfacer las expectativas generadas al principio del planteamiento del Proyecto. En primer lugar, porque ofrece una respuesta concreta y científicamente fundamentada (basada en resultados) a las dos preguntas planteadas en el espectro de la viabilidad técnica:

¿Cuántos helipuertos debe incorporar la estación?

¿Cómo de grande debe ser la reserva de baterías de la estación?

Se ha obtenido respuesta a ambas preguntas que, además, se corresponde con lo esperado al comienzo del desarrollo del Proyecto en términos tanto de capacidad de transporte de pasajeros como de consumo de energía. A la luz de estos resultados también se observa que el comportamiento de los aerotaxis y viajeros dentro de la estación corresponden con lo esperado, pues los tiempos de espera no resultan excesivos y el sistema evoluciona de manera coherente con lo que se espera de una estación real, si bien algunos aerotaxis que llegan en hora punta tienen que esperar, pero muchos otros reciben servicio de inmediato.

En segundo lugar, porque es capaz también de dar respuesta a las preguntas estratégicas desde la perspectiva de la gestión de infraestructuras:

¿Cuál es la calidad del servicio ofrecido?

¿Cuál es el coste de ofrecer un servicio con la calidad deseada?

De nuevo los resultados arrojaron valores que se ajustaban a lo esperado. Se comprobó que la configuración escogida es capaz de ofrecer un servicio de aerotaxis de buena calidad a un coste asumible .

En las simulaciones animadas también se puede observar cómo el comportamiento de todos los elementos y agentes es el anticipado (con aerotaxis que llegan a la estación, pasajeros que montan en ellos, colas que se forman ante la saturación, etc.).

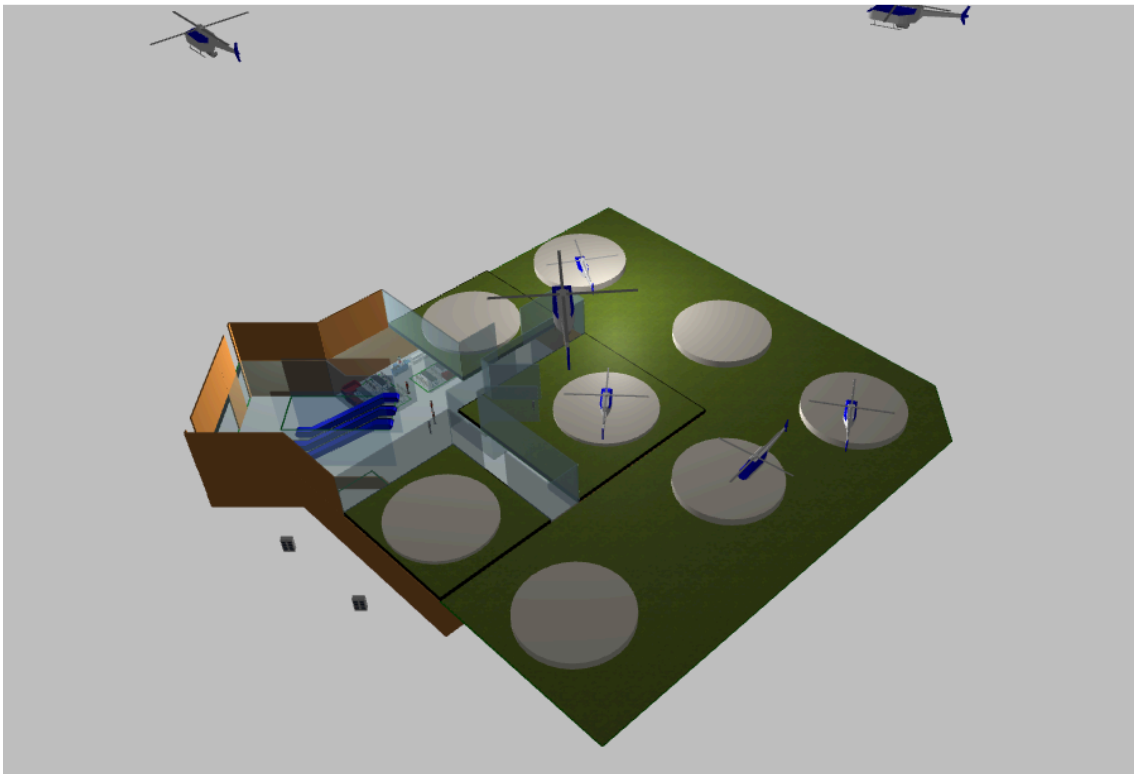


Figura 47: Vista aérea de la estación en funcionamiento en un punto dado de la simulación, en la que se muestra también la configuración elegida para los ocho helipuertos Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

La arquitectura basada en agentes empleada en el modelo obtenido, además, resulta en un modelo replicable. Esta configuración también permite variar los parámetros e incluso el diseño y funcionamiento de los diferentes agentes sin afectar en gran medida al funcionamiento del modelo. Si, se deseara, por ejemplo, utilizar un modelo de aerotaxi diferente al seleccionado en el experimento, tan sólo es necesario crear un nuevo agente y eliminar/ ignorar el que ya existe, o bien introducir los parámetros del nuevo modelo en el agente ya creado si el funcionamiento es similar y tan sólo varían las dimensiones.

Respecto a la escalabilidad del Modelo, éste es escalable en lo que respecta al número de helipuertos, ya que se ha realizado un diseño que permite tanto la elección anticipada del número de helipuertos a instalar como la personalización de la disposición de los mismos en el espacio de la estación. Del mismo modo, el uso de horarios para encapsular la demanda de salidas y llegadas abre al usuario la posibilidad de realizar

estudios para otras zonas donde la demanda pudiera ser mayor o menor con tan sólo introducir el nuevo horario de demanda estimada.

Se ha comprobado también que la realización de un modelo conceptual previa al diseño del modelo ayudó en gran medida a la obtención de un modelo robusto y verosímil. A pesar de que alguna casuística que fue concebida de una determinada manera haya terminado por desarrollarse utilizando otra estrategia⁴⁷ la mayoría de flujos y agentes sí han replicado en su totalidad el funcionamiento planteado en el diseño del modelo conceptual.

Se ha visto cómo la simulación resulta una herramienta muy útil a la hora de planificar proyectos, permitiendo realizar pruebas para fundamentar decisiones que, de lo contrario, deberían ser bien calculadas mediante complejos modelos matemáticos, que se limitan a arrojar resultados y no permiten una visualización de los procesos que ocurren. La simulación es también ventajosa frente a las pruebas físicamente mediante la construcción de estaciones piloto, que conllevan una importante inversión.

La incorporación de animaciones se ha revelado como una herramienta que permite visualizar de una manera práctica el comportamiento de la estación, así como los efectos de cualquier cambio que se desee realizar en modelos de este tipo. Este es el caso, por ejemplo, del número de helipuertos, puesto que inicialmente se planteó la estación con tres helipuertos, para, posteriormente, ampliar hasta ocho.⁴⁸ Esto cobra mayor importancia si se tiene en cuenta que el objeto de estudio es el espacio aéreo, pues en este caso la realización de prototipos físicos de prueba puede no llegar a ser aprobada por poner en riesgo la seguridad urbana.

⁴⁷ Es el caso del flujo de movimiento de las baterías desde el almacén hacia los aerotaxis, que, en el modelo conceptual, fue modelada con su propio diagrama de flujo mientras que en el modelo real se ha incorporado al flujo de aerotaxis debido a la decisión de utilizar los bancos de recursos para gestionar las baterías

⁴⁸ Gracias a las animaciones incorporadas se pudo observar el efecto de este cambio de una manera mucho más clara, pues en las simulaciones con tres helipuertos se observa cómo se satura el espacio aéreo casi de inmediato para las condiciones de demanda dada, mientras que en las realizadas tras la ampliación se puede ver cómo el nuevo diseño respondía de una manera mucho más eficaz

7.2. Desarrollos Futuros

Se ha procurado, desde la concepción del problema y durante toda la etapa de diseño, que el modelo a implementar fuera escalable y replicable en la mayor medida posible, y que su funcionamiento y diseño quedase completamente descrito en este Documento, siempre con vistas a poder ser utilizado para reforzar el diseño de una estación real en el futuro, o bien para futuros estudios sobre diseño de estaciones de aerotaxi que requieran de un modelo de simulación para fundamentar decisiones y obtener resultados.

A pesar de conseguir cumplir con los objetivos de modelado, el modelo construido tiene margen de ulterior desarrollo, por ejemplo, incorporando la posibilidad de seleccionar un número máximo de baterías que pueden estar recargando al mismo tiempo.

Debido a la cantidad de variables intermedias y bases de datos que se calculan y actualizan en tiempo real durante la ejecución de cada experimento de simulación, para las simulaciones más cortas (16.000 segundos) bastó con dedicar 4096 Mb de memoria RAM al experimento utilizando un procesador de cuatro núcleos. Sin embargo, para las simulaciones de mayor duración (86.400 segundos, es decir, un día) se tuvo que hacer uso de un ordenador adicional de altas prestaciones (al Experimento III, por ejemplo, se le tuvo que dedicar la totalidad de los 16.386 Mb de memoria RAM en un ordenador con procesador de ocho núcleos, pues, de lo contrario, la simulación se detenía alrededor de los 30.000 segundos desde el inicio de la simulación debido a falta de memoria dinámica). Se propone, para futuros desarrollos la utilización de una memoria dinámica y potencia de cálculo mayores que permitan replicar los experimentos un mayor número de veces con vistas a afinar la precisión de las simulaciones permitiendo de este modo elevar el nivel de confianza deseado para las variables de salida.

Para futuros desarrollos del proyecto en los que el objeto de estudio pudieran ser los flujos de personas dentro de la estación, se puede aprovechar la incorporación de transeúntes al modelo, con vistas a aplicaciones en el diseño de accesos, pasillos y espacios en el interior de la estación. Su incorporación, sin embargo, resultó contraproducente a la hora de realizar los experimentos, pues la presencia de más agentes

consume demasiados recursos del sistema, generando simulaciones más lentas y que, en ocasiones, no llegaban a completarse debido a falta de memoria dinámica. Por este motivo, se decidió no incluir a los transeúntes durante los experimentos.

La incorporación de animaciones, a pesar de considerarse esenciales por aportar un carácter comercial y de visualización al proyecto (pues se anticipa mucho más fácil vender el proyecto si los posibles compradores pueden ver el funcionamiento del sistema a través de animaciones, en lugar de a través de números) también supuso un lastre computacional, debiendo éstas ignorarse durante la ejecución de los experimentos. Se recomienda, sin embargo, la utilización de animaciones en desarrollos futuros para verificar de manera visual el correcto funcionamiento del modelo.

En desarrollos futuros sería conveniente tener en cuenta un límite de baterías recargando al mismo tiempo, en busca de reducir la instalación de potencia eléctrica total requerida por el sistema. . Esto ya se intuyó a la luz de los resultados del Experimento II, donde se examinó la evolución del número de baterías cargadas y en proceso de carga en la estación.

También se propone la incorporación al modelo de las tareas de mantenimiento, que se pueden programar mediante la biblioteca de gestión de recursos y cuya inclusión queda fuera del alcance del proyecto. De esta manera, si, por ejemplo, se deseara realizar una inspección de las baterías cada cierto tiempo, se podría diseñar un flujo adicional que describa esta tarea para, posteriormente, añadir la opción de incorporar estas operaciones de mantenimiento al banco de recursos que gestiona las baterías (los bancos de recursos en Anylogic ofrecen esta posibilidad). Habiendo realizado esta modificación, se podría considerar también realizar el cálculo del coste de mantenimiento de manera dinámica, de manera similar al método implantado para calcular el coste eléctrico.

Se propone por último, como desarrollo futuro que extienda las capacidades del modelo, la implementación del modelo en uno de jerarquía superior que represente una red de aerotaxis al completo con múltiples estaciones. Este modelo se podría construir utilizando para ello la simulación GIS, que es capaz de situar a través de una conexión a internet los agentes en un mapa interactivo y trazar rutas entre ellos. De esta manera, se

podrían estudiar otras variables de decisión relativas a las redes de aerotaxi, como puede ser el número de aerotaxis necesarios en la flota, la ubicación de las estaciones o las rutas a seguir. A modo de ejemplo, este modelo puede ser replicado para una red completa de aerotaxis en la ciudad de Madrid⁴⁹ o en cualquier otra ciudad, en la que las condiciones de contorno pudieran ser otras.

Además, la simulación es una herramienta muy potente ya que es capaz de anticipar respuestas a las preguntas de diseño, no sólo en el sector de transportes, sino también en otros ámbitos de naturalezas muy diferentes si se selecciona la estrategia adecuada. Así, por ejemplo, la simulación de eventos discretos puede ser empleada para modelar cualquier proceso regido por las leyes de la teoría de colas (desde un supermercado hasta un centro de atención telefónica), la estrategia de sistemas dinámicos se puede emplear para modelar sistemas donde existen fuertes interdependencias diferenciales entre variables (simulación de procesos térmicos, químicos, etc.) mientras que la basada en agentes permite la simulación de sistemas muy desordenados en los que no se conocen directamente las relaciones entre variables pero sí el comportamiento de los agentes individuales y del entorno (se puede utilizar, por ejemplo, para realizar modelos de propagación de enfermedades o modelos de evolución de poblaciones).

⁴⁹ Plaza (2019) propone para realizar un estudio completo basado en datos experimentales acerca de una red de aerotaxis en la ciudad de Madrid

Bibliografía

- Andres, B., Sanchis, R. & Poler, R., 2016. Modelado y Simulación de la Cadena de Suministro con Anylogic. *Universidad Politécnica de Valencia: Modeling in Science Education and Learning*, 9(1).
- Bajard, Fabien. 2019. *Diseño de una Estación de Aerotaxis*. ICAI - Universidad Pontificia de Comillas
- Bacchini, A. & Cestino, E., 2019. Electric VTOL Configurations Comparison. *Aerospace*, Febrero.
- Buckley, J., 1998. *Air Power in the Age of Total War*. s.l.:Indiana University Press.
- Chwif, L., Paul, R. J. & Barreto, M. R. P., 2000. *On Simulation Model Complexity*. s.l., s.n.
- eVTOLnews, 2019. [En línea] www.evtol.news
- Farid, G., Hongwei, M., Ali, S. M. & Liwei, Q., 2017. A review on linear and nonlinear control techniques for position and attitude control of a quadrotor. *Control and Intelligent Systems*, 45(1).
- Furian, N. y otros, 2015. A conceptual modeling framework for discrete event simulation using hierarchical control structures. En: *Simulation Modeling and Practice Theory*. s.l.:s.n.
- Gilbey, S. W., 1903. *Early Carriages and Roads*. Londres: Vinton & co., ltd.
- Hurley, S., 2012. The Surprisingly Old Story Of London's First Ever Electric Taxi. *Science Museum of London Blog*.
- Kane, R., 2009. Air Taxi Logistics System.
- Karem, A., 2019. eVTOL Having Many Variable Speed Tilt Rotors.
- Karnon, J. y otros, 2012. Modeling using Discrete Event Simulation: A Report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force-4. *Value in Health*, Volumen 15, pp. 821-827.
- Kellermann, R., Biehle, T. & Fischer, L., 2020. Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Volumen 4.
- Kikuchi, S., Rhee, J. & Teodorovic, D., 2002. Applicability of an agent-based modeling concept to modeling of transportation phenomena. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 12(2), pp. 141-156.
- Lilium gmbh, 2020. *lilium*. [En línea]. www.lilium.com
- Lioris, E., Cohen, G. & de la Fortelle, A., 2010. Evaluation of Collective Taxi Systems by Discrete-Event Simulation. *Second International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 34-39.
- Mahmoud, S., Mohamed, N. & Al-Jaroodi, J., 2015. Integrating uavs into the cloud using the concept of the web of things. *Journal of Robotics*.
- Melcher, T. W., 2019. Electric Vertical Take-Off and Landing Aircraft.
- Meadows, D., 2008. *Thinking in Systems*. 1 ed. Vermont: Chelsea Green Publishing.
- Mohammed, F. y otros, 2014. UAVs for smart cities: Opportunities and challenges. *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, May, pp. 267-273.

Bibliografía

- Moore, M., 2010. Puffin Electric Tailsitter VTOL Concept. *Proceedings of the 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Septiembre.
- NASA, 2010. [En línea]. www.nasa.gov
- Plaza, L., 2019. *Planificación de la Logística y Actividad Económica del Servicio de Aerotaxi Eléctrico en Madrid*, ICAI-Universidad Pontificia de Comillas
- Perez-Montenegro, C. y otros, 2018. *A Mission Coordinator Approach for a Fleet of UAVs in Urban Scenarios Scenarios*. Turin, Elsevier.
- Phenix, M., 2016. The Flying Machine in your Back Garden. *BBC news*, 12 Mayo.
- Pradeep, P., 2019. Arrival management for eVTOL aircraft in on-demand urban air mobility. *Graduate Theses and Dissertations. 17076*. Iowa State University.
- Pring-Mill, D., 2018. Drone Taxi Service Could Impact Urban Infrastructure. *ENR Future Tech*, 6 Abril, p. 49.
- Rosen, C., 2020. EVTOL Aircraft.
- Schumann, B., Takeda, K. & Scanlan, J., 2011. *A Generic Operational Simulation for Early Design Civil Unmanned Aerial Vehicles*. Southampton, SIMUL 2011 : The Third International Conference on Advances in System Simulation.
- Salanova, J. M., Estrada, M. A., Mitsakis, E. & Stamos, I., 2013. Agent Based Modeling for Simulation of Taxi Services. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 1(2), pp. 159-163.
- Salanova, J. M., Estrada, M., Tzenos, P. & Aifandopoulou, G., 2018. Agent-Based Simulation Framework for the Taxi Sector Modeling. *Procedia Computer Science*, Volumen 130, pp. 294-301.
- Uber, 2020. *Uber*. [En línea]
Available at: uber.com
- Volocopter, 2020. *Volocopter*. [En línea] www.volocopter.com
- Yang, H. & Wong, S., 1998. A network model of urban taxi services. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(4), pp. 235-246.
- Zart, N., 2020. *Electrek: First electric VTOL Lilium Jet prototype goes up in flames.* [En línea]
<https://electrek.co/2020/03/02/first-electric-vtol-lilium-jet-prototype-goes-up-in-flames/>

II
MEMORIA ECONÓMICA

PRESUPUESTO DE PROYECTO

Recursos Informáticos:

- Licencia Anylogic Professional: **1,265,85 €**
- Ordenador Asus Zenbook 14 UX431FA-AM128: **800 €**

Recursos Laborales:

- Horas del ingeniero (investigación y análisis):100h
 - Retribución: 100 €/h
- Horas del programador: 200 h
 - Retribución: 40 €/h ⁵⁰
- Horas de redacción (personal administrativo): 100 h
 - Retribución: 15 €/h ⁵¹

Depreciación de equipos:

Periodo:		0	1	2	3	4	5
Vida útil (años) 5	Valor inicio	800.00 €	520.00 €	338.00 €	219.70 €	142.81 €	92.82 €
Valor inicial 800.00 €	Depreciación	35.00%	35.00%	35.00%	35.00%	35.00%	13.81%
Valor residual 80.00 €	Valor deprec.	280.00 €	182.00 €	118.30 €	76.90 €	49.98 €	12.82 €
	Valor fin	520.00 €	338.00 €	219.70 €	142.81 €	92.82 €	80.00 €
Depreciación	35.00%						

Tabla 6: Depreciación anual del equipo informático. Fuente: Elaboración propia.

⁵⁰ Basado en una retribución salarial anual sin complemento de destino para el grupo B de 12.488,90 € (Ministerio de Hacienda, 2020).

⁵¹ Basado en una retribución salarial anual sin complemento de destino para el grupo C1 de 10.727,38 € (Ministerio de Hacienda, 2020).

Presupuesto:

Concepto	Coste por ud./hora	Cantidad (uds./horas)	TOTAL
Licencias de software	1.265,85 €/ud	1 ud.	1.265,85 €
Equipo Informático (Amortización de equipo ⁵²)	800,00 €/ud (520,00 €/ud)		
Equipos Amortizados	280,00 €/ud	1 ud.	280,00 €
Retribución Ingeniero	100,00 €/hora	100 horas	10.000,00 €
Retribución Programador	40,00 €/hora	200 horas	8.000,00 €
Retribución Personal Administrativo	15 €/hora	100 horas	1.500,00 €
TOTAL PROYECTO			21.045,85 €

Tabla 7: Presupuesto del Proyecto. Fuente: Elaboración propia.

⁵² Basado en una vida útil de 5 años y un valor residual de 80€. Depreciación (acumulada) = 40% por año. Se supone que el equipo se vende al año siguiente.

III
ANEXOS

Anexo: Relación con los O.D.S. de la O.N.U.

En este apartado se estudiará el grado de alineación que un proyecto como este puede tener con los objetivos marcados por las Naciones Unidas para garantizar el desarrollo sostenible en el futuro⁵³. Se han encontrado correspondencias con cuatro de estos objetivos:

Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.

Este Proyecto proporciona una herramienta para un sector completamente inexistente a día de hoy como es el aerotaxi. Según lo marcado en la segunda meta establecida por la O.N.U. para este objetivo, se deben *lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación*. A través de la apuesta por las nuevas tecnologías de transporte como el aerotaxi, no sólo se produce la innovación, sino que se muestra apoyo a una tecnología disruptiva cuyo objetivo indirecto es el de sentar las bases de un nuevo paradigma del modelo de transporte privado (e incluso público).

Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.

El Proyecto, lejos de centrarse en estudiar una estación de aerotaxis concreta, ofrece una herramienta con la que poder desarrollar futuras estaciones en diferentes entornos y bajo condiciones diversas. Se viene haciendo énfasis durante todo el documento en la capacidad de **re-organización** estructural del modelo, que no se limita a una configuración pre-establecida y permite realizar modificaciones como el número y la ubicación de los helipuertos, el tamaño del stock de baterías y la demanda estimada. Esta capacidad adaptativa brinda a futuros equipos de diseño la posibilidad de elaborar

⁵³ Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible para el Año 2030 (O.N.U., 2020)

un **diseño más resiliente** que no sufra ante, por ejemplo, un cambio demográfico (alteración de la demanda).

Objetivo 11: Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

Se debe tener en consideración que el aumento del nivel del mar en algunas poblaciones demandará soluciones alternativas al problema del transporte. En este punto cobra relevancia el papel del transporte aéreo, que se plantea como una alternativa adaptada ante una posible incapacidad futura de extender las rutas de transporte terrestres. El aerotaxi puede ser una alternativa viable a los vehículos convencionales terrestres en entornos urbanos bajo amenaza de inundación como Zwolle (Países Bajos) o Venecia (Italia).

Así mismo, en materia de seguridad, la conducción autónoma (tecnología que incorporan la mayoría de proyectos de aerotaxi existentes) está llamada a solucionar aquellos problemas de seguridad derivados de los errores humanos. Se prevé que esta tecnología reduzca el número de accidentes y permita avanzar hacia un modelo de transporte más seguro.

En materia de energía, al tratarse de vehículos impulsados por motores eléctricos, se prevé una reducción directa del impacto ambiental frente a las tecnologías de transporte aéreo privado actuales (helicópteros, avionetas) ya que, aún en el caso de que la estación hiciera uso de energía generada en plantas a partir de la combustión de recursos fósiles, el impacto ambiental sería menor que si esta combustión se produjese directamente en el interior de los vehículos (como es el caso actual) debido al mayor rendimiento de los generadores presentes en centrales eléctricas frente al de motores individuales. De cualquier manera, se espera que la estación pueda obtener la energía de un mix energético más sostenible que el actual (que incluya, por ejemplo, una mayor presencia de energía nuclear y solar), en armonía con las metas estipuladas para el *Objetivo 7 (Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna)* como son *aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes*

energéticas y duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética para el año 2030.

Objetivo 15: Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica.

La transición del transporte privado al espacio aéreo permitirá también ralentizar la creación de rutas terrestres nuevas (que pudieran poner en peligro ecosistemas terrestres), así como prescindir de algunas ya existentes, facilitando estos espacio para la proliferación de nuevos ecosistemas naturales. Se espera llegar a un modelo de transporte cuyo punto fuerte sea precisamente el de abandonar de manera progresiva las carreteras y reducir con ello el impacto sobre la vida terrestre.

Infraestructuras como los ecoductos instalados recientemente en países como Bélgica, EE.UU., España o Países Bajos⁵⁴ muestran cómo las carreteras actúan de barrera divisoria entre ecosistemas. Se espera que la transición paulatina al espacio aéreo frene esta fragmentación de los hábitats naturales que permita una mayor libertad de movimiento de especies animales y vegetales.

⁵⁴ Wildlife Crossing Project, (Unión Europea, 2020)

Anexo: Gráficos

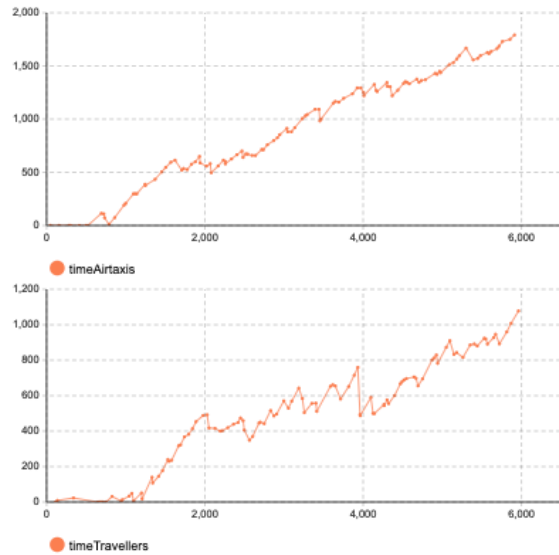


Figura 48: Experimento I: Tiempos de espera de pasajeros y aerotaxis para cuatro helipuertos. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

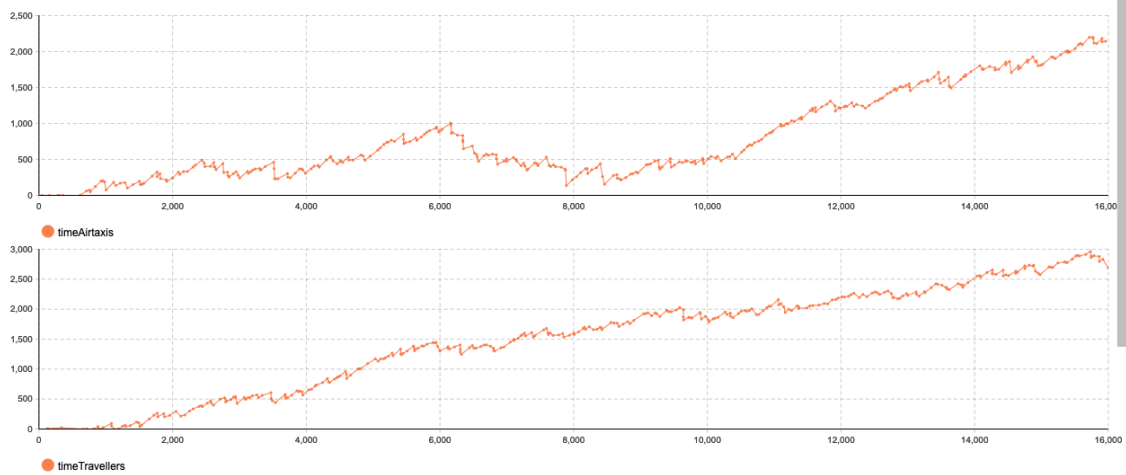


Figura 49: Experimento I: Tiempos de espera de pasajeros y aerotaxis para cinco helipuertos. Fuente: Elaboración propia en Anylogic.

