



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**GESTIÓN DE COLAS EN ELECTROLINERAS**

Autora: Rocío Colomina Muñoz

Directores: Andrés D. Díaz Casado y Andrés Ramos Galán

Madrid

Junio de 2025



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

Gestión de colas en electrolinerías

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

curso académico 2024/25 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.: Rocío Colomina Muñoz

Fecha: ...09/ .06../2025.

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.: Andrés Ramos Galán

Fecha: ...../ ...../ .....

Fdo.: Andrés D. Díaz Casado

Fecha: ...../ ...../ .....





**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

**GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ORGANIZACIÓN**

**TRABAJO FIN DE GRADO**  
**GESTIÓN DE COLAS EN ELECTROLINERAS**

*Autora: Rocío Colomina Muñoz*

*Directores: Andrés D. Díaz Casado y Andrés Ramos Galán*

Madrid

Junio de 2025



# Agradecimientos

En primer lugar, gracias a mis padres, por creer en mí desde el primer momento, por darme la oportunidad de seguir la carrera que elegí y por enseñarme, con su ejemplo, los valores que me han guiado hasta aquí. Todo lo que soy es gracias a vosotros.

A mis abuelas, que no tuvieron la oportunidad de estudiar una carrera, pero cuya fuerza, sabiduría y esfuerzo han sido un faro para mí. Este logro también es vuestro.

A mi familia y a mis amigos, por estar siempre presentes con palabras de ánimo, con su compañía y cariño incondicional. A mis amigas de la carrera, gracias por vuestro apoyo constante y por hacer este camino mucho más llevadero.

A mis tutores, por acompañarme con paciencia y dedicación. De vosotros me llevo el ejemplo de grandes profesionales y, sobre todo, grandes personas, a quienes recordaré con gratitud.

Por último, gracias a mi universidad, por brindarme el espacio para crecer académica y personalmente, y por haber sido el escenario de tantas experiencias que me han marcado.



# GESTIÓN DE COLAS EN ELECTROLINERAS

**Autora: Colomina Muñoz, Rocío.**

Directores: Díaz Casado, Andrés Diego y Ramos Galán, Andrés.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto presenta el desarrollo de un simulador para analizar el rendimiento operativo y la rentabilidad económica de una electrolinera, apoyando la toma de decisiones en su diseño. A través de un modelo de simulación estocástico, implementado en Python/Simpy y desplegado en web vía Streamlit, se han evaluado indicadores clave para distintas configuraciones de los cargadores. Una vez validado el modelo, se ha aplicado a un caso de estudio realista con demanda proyectada para 2030. La aplicación está alojada públicamente en la siguiente dirección: <HTTPS://SIMULADOR-ELECTROLINERA-FSE3FELJFWITU6KERIUAV.STREAMLIT.APP/>.

**Palabras clave:** electrolinera, infraestructura de recarga, vehículo eléctrico, simulación de eventos discretos

### 1. Introducción

La infraestructura de recarga pública representa uno de los elementos clave para garantizar la viabilidad del vehículo eléctrico. Numerosos estudios apuntan a que aspectos como la disponibilidad de cargadores, los tiempos de espera, la flexibilidad de uso y la cobertura territorial condicionan tanto la experiencia del usuario como el ritmo de adopción de esta tecnología [1]. En particular, el entorno interurbano presenta retos específicos debido a la necesidad de atender una demanda variable y garantizar tiempos de recarga razonables en trayectos de media y larga distancia [2]. En el caso de España, a pesar del crecimiento sostenido del parque de vehículos eléctricos, la red de recarga sigue siendo insuficiente y está marcada por una distribución desigual y una elevada proporción de cargadores lentos respecto a los de alta potencia [3].

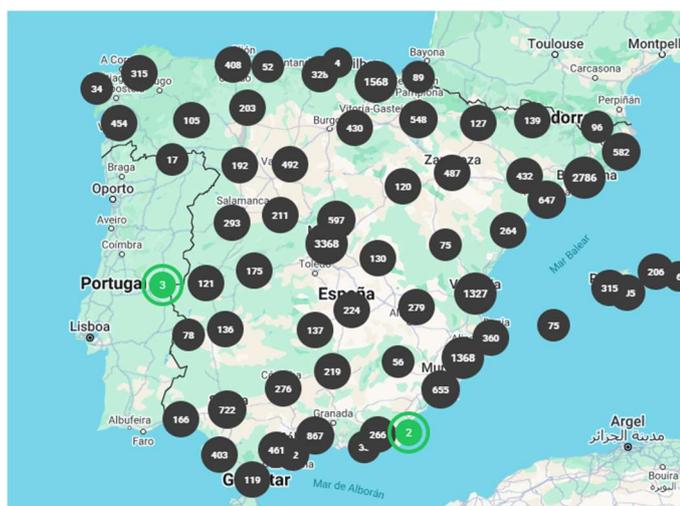


Figura 1. Mapa de cargadores públicos en España en 2025 [3]

Ante este contexto, cobra especial importancia el desarrollo de herramientas que permitan evaluar el comportamiento de una electrolinera bajo distintos escenarios de demanda e infraestructura, integrando no solo factores técnicos, sino también criterios económicos.

## 2. Definición del proyecto

El proyecto parte de la necesidad de disponer de herramientas que permitan evaluar, de forma flexible y parametrizable, el comportamiento de una electrolinera bajo distintos escenarios de configuración y demanda. La finalidad principal es desarrollar una solución que, más allá de un caso concreto, sea capaz de adaptarse a diferentes supuestos técnicos y económicos, proporcionando resultados precisos y comparables. Esta herramienta está concebida para ser utilizada tanto en la evaluación de electrolineras existentes, ayudando a identificar posibles mejoras operativas, como en la planificación de nuevas instalaciones. Para validar su utilidad, se ha aplicado a un caso de estudio representativo.

## 3. Descripción del modelo

La herramienta desarrollada se basa en un modelo de simulación de eventos discretos implementado en Python mediante la biblioteca SimPy, con una interfaz web accesible creada en Streamlit. Su propósito es reproducir el funcionamiento de una electrolinera bajo distintas condiciones operativas, permitiendo evaluar su comportamiento a lo largo de un año completo de simulación. El usuario puede definir libremente los parámetros de entrada a través de archivos CSV.

Durante la simulación, los vehículos eléctricos llegan a la estación según una distribución temporal configurable y se clasifican por tipo, asignándoseles una capacidad de batería y una necesidad de recarga aleatoria dentro de un rango definido. Cada vehículo intenta acceder a un cargador disponible acorde con sus características, y en caso de estar todos ocupados, puede entrar en cola. Si las colas de todos los cargadores compatibles han alcanzado su capacidad máxima, el vehículo abandona la estación sin ser atendido. El programa gestiona en paralelo los procesos de llegada, espera, carga, salida y registro de cada vehículo, reproduciendo el comportamiento dinámico de la electrolinera a lo largo del periodo simulado.

Las variables que el usuario puede configurar incluyen, entre otras: el número de cargadores, su potencia individual, los tipos y proporciones de vehículos eléctricos, los precios de compra y venta de energía, y los costes asociados a la infraestructura (inversión, mantenimiento, operación). A partir de estos datos, la herramienta genera una serie de resultados que incluyen: tasa de ocupación de los cargadores, energía suministrada, tiempos de espera y carga, número de vehículos atendidos o que abandonan, y métricas económicas como ingresos, costes totales y rentabilidad (ROI).

#### 4. Resultados

A partir de la aplicación del simulador a un caso de estudio, se han evaluado múltiples configuraciones de cargadores bajo condiciones técnicas y económicas. Cada alternativa ha sido analizada en función de una serie de indicadores. La herramienta ha permitido realizar comparativas entre configuraciones que combinan distintos números y potencias de cargadores, manteniendo constantes la demanda anual, los parámetros económicos, la distribución de los tipos de vehículos y las condiciones generales del modelo.

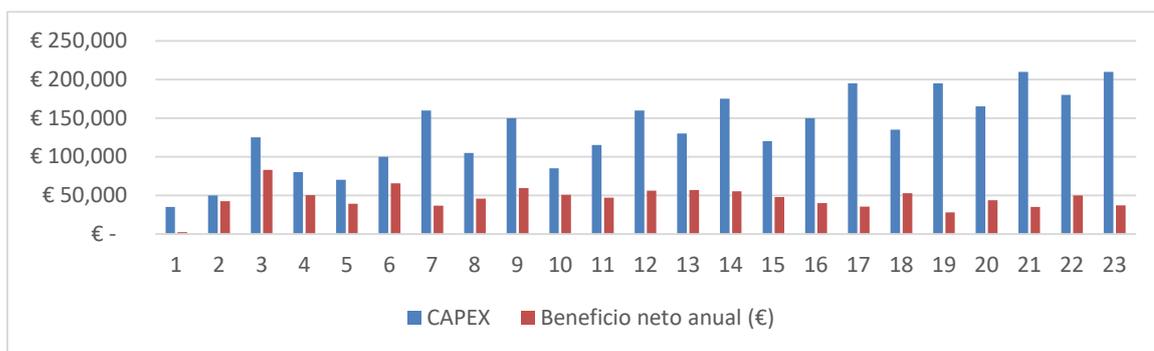


Figura 2. Relación entre el coste de inversión inicial y el beneficio neto anual para cada una de las configuraciones evaluadas.

En la Figura 2 se representa la relación entre el coste de inversión inicial (CAPEX) y el beneficio neto anual para cada una de las configuraciones simuladas, lo que permite visualizar de forma clara el rendimiento económico de cada alternativa. El análisis ha puesto de manifiesto que no todas las configuraciones con alto ROI garantizan un buen nivel de servicio, y viceversa. Por ello, se ha aplicado un enfoque multicriterio para

seleccionar las opciones más equilibradas, priorizando aquellas que combinan una rentabilidad elevada con una tasa de abandono reducida y una ocupación eficiente de la infraestructura. Finalmente, se han identificado tres configuraciones óptimas para su análisis detallado, incluyendo una alternativa generalista especialmente equilibrada, otra con enfoque económico y una tercera orientada a vehículos de gama alta, lo que permite cubrir distintos escenarios de aplicación.

## 5. Conclusiones

El desarrollo de esta herramienta ha permitido disponer de un sistema flexible, parametrizable y fácilmente adaptable para simular el comportamiento de una electrolinera. Su aplicación a un caso de estudio ha demostrado su utilidad para comparar alternativas de diseño y dimensionamiento, identificar cuellos de botella operativos y evaluar la rentabilidad de cada opción. Los resultados obtenidos muestran que es posible alcanzar un equilibrio entre eficiencia económica y calidad del servicio, y que la configuración óptima depende en gran medida del perfil de demanda y los objetivos del operador. El simulador desarrollado constituye así una base sólida para apoyar la toma de decisiones estratégicas en la planificación y mejora de infraestructuras de recarga para vehículos eléctricos.

## 6. Referencias

- [1] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, «Reglamento (UE) 2023/1804 sobre el despliegue de infraestructura de combustibles alternativos,» Bruselas, 2023.
- [2] International Energy Agency (IEA), «Global EV Outlook 2024 - Trends in Electric Cars,» París, 2024.
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Programa MOVES III – Subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos y la instalación de puntos de recarga,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii>.
- [4] Red eléctrica, «Mapa Reve,» [En línea]. Available: [mapareve.es/mapa-puntos-recarga](http://mapareve.es/mapa-puntos-recarga).

# QUEUE MANAGEMENT IN ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS

**Author:** Colomina Muñoz, Rocío.

Supervisors: Díaz Casado, Andrés Diego y Ramos Galán, Andrés.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

This project presents the development of a simulator designed to analyze the operational performance and economic profitability of electric vehicle charging stations, supporting decision-making in their design. Using a stochastic simulation model implemented in Python and accessible through a Streamlit interface, key performance indicators have been evaluated across different charger configurations. Once validated, the model was applied to a realistic case study with projected demand for the year 2030. The application is publicly hosted at the following address: [HTTPS://SIMULADOR-ELECTROLINERA-FSE3FELJFWITU6KERIUAV.STREAMLIT.APP/](https://simulador-electrolinera-fse3feljfwitu6keriuav.streamlit.app/).

**Keywords:** charging station, charging infrastructure, electric vehicle, discrete-event simulation

## 1. Introduction

Public charging infrastructure is one of the key elements in ensuring the viability of electric vehicles. Numerous studies highlight that factors such as charger availability, waiting times, ease of use, and territorial coverage significantly influence both the user experience and the rate of adoption of this technology [1]. In particular, the interurban environment presents specific challenges due to the need to manage variable demand and ensure reasonable charging times on medium- and long-distance routes [2]. In the case of Spain, despite the steady growth of the electric vehicle fleet, the charging network remains insufficient and is characterized by uneven distribution and a high proportion of slow chargers compared to high-power alternatives [3].

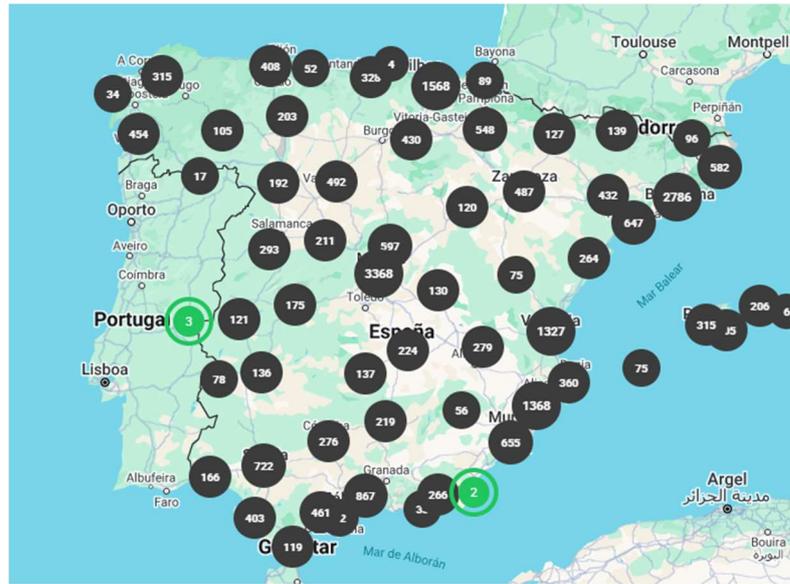


Figure 1. Public charging points in Spain in 2025 [3]

In this context, the development of tools that allow the evaluation of a charging station's behavior under different demand and infrastructure scenarios becomes especially relevant, integrating not only technical factors but also economic considerations.

## 2. Project definition

The project arises from the need for tools capable of flexibly and parametrically evaluating the behavior of a charging station under different configuration and demand scenarios. The main objective has been to develop a solution that, beyond a specific case, can adapt to various technical and economic assumptions, providing accurate and comparable results. The tool is designed to be used both in the evaluation of existing charging stations—helping to identify potential operational improvements—and in the planning of new installations. To validate its usefulness, it has been applied to a representative case study.

## 3. Description of the model

The tool developed is based on a discrete-event simulation model implemented in Python using the SimPy library, with an accessible user interface built in Streamlit. Its purpose is to reproduce the behavior of a charging station under different operating conditions, allowing the evaluation of its performance over the course of a full simulation year. Users can freely define input parameters through CSV files.

During the simulation, electric vehicles arrive at the station according to a configurable time distribution and are classified by type, with each assigned a battery capacity and a randomly determined charging requirement within a defined range. Each vehicle attempts to access an available charger that matches its characteristics, and if all are occupied, it may join a queue. If the queues for all compatible chargers have reached their maximum capacity, the vehicle leaves the station without being served. The

program manages in parallel the processes of arrival, waiting, charging, departure, and registration of each vehicle, reproducing the dynamic behavior of the charging station throughout the simulated period.

The variables that the user can configure include, among others: the number of chargers, their individual power ratings, the types and proportions of electric vehicles, energy purchase and sale prices, and the costs associated with the infrastructure (investment, maintenance, operation). Based on these inputs, the tool generates a set of results that include: charger occupancy rate, energy delivered, waiting and charging times, number of vehicles served or that abandon the station, and economic metrics such as revenue, total costs, and return on investment (ROI).

#### 4. Results

Based on the application of the simulator to a case study, multiple charger configurations have been evaluated under consistent technical and economic conditions. Each alternative has been analyzed using a set of performance indicators. The tool has enabled comparisons between configurations combining different numbers and power levels of chargers, while keeping constant the annual demand, economic parameters, vehicle type distribution, and the general conditions of the simulation model.

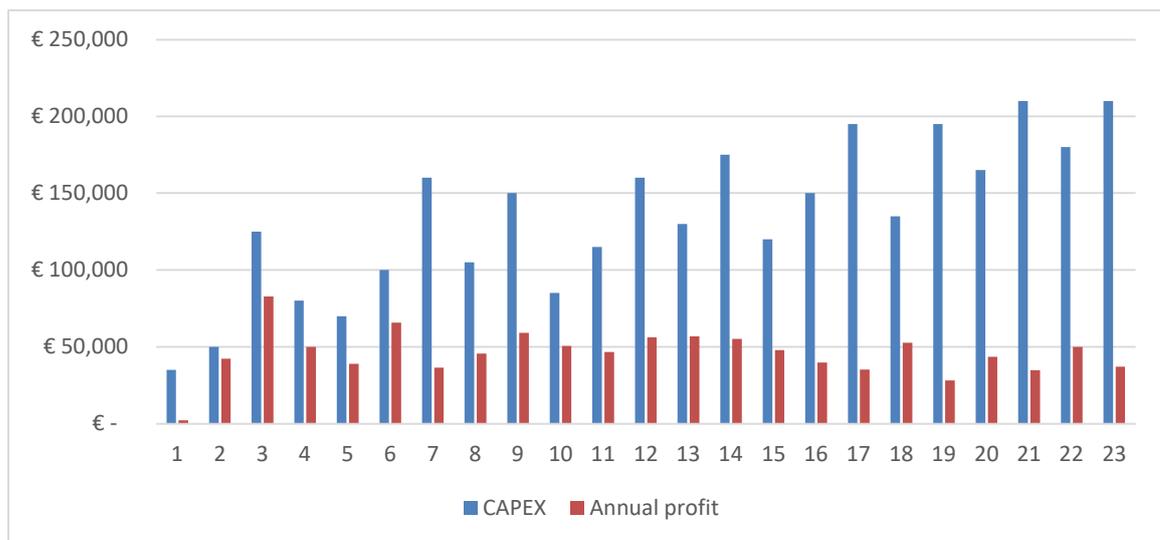


Figure 2. Relationship between initial investment cost and annual net profit for each of the evaluated configurations.

Figure 2 shows the relationship between the initial investment cost (CAPEX) and the annual net profit for each of the simulated configurations, allowing for a clear visualization of the economic performance of each alternative. The analysis has revealed that not all configurations with a high ROI necessarily guarantee an adequate level of service, and vice versa. For this reason, a multi-criteria approach has been applied to identify the most balanced options, prioritizing those that combine high profitability with a low abandonment rate and efficient charger utilization. As a result, three optimal

configurations have been selected for detailed analysis: a well-balanced generalist alternative, an economically focused option, and a third aimed at high-end electric vehicles, covering a range of potential application scenarios.

## **5. Conclusion**

The development of this tool has provided a flexible, configurable and easily adaptable system for simulating the behavior of an electric vehicle charging station. Its application to a case study has demonstrated its usefulness in comparing design alternatives, identifying operational bottlenecks, and evaluating the profitability of each option. The results show that it is possible to achieve a balance between economic efficiency and service quality, and that the optimal configuration largely depends on the demand profile and the operator's objectives. The simulator therefore provides a solid foundation to support strategic decision-making in the planning and improvement of electric vehicle charging infrastructure.

## **6. References**

- [1] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, «Reglamento (UE) 2023/1804 sobre el despliegue de infraestructura de combustibles alternativos,» Bruselas, 2023.
- [2] International Energy Agency (IEA), «Global EV Outlook 2024 - Trends in Electric Cars,» París, 2024.
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Programa MOVES III – Subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos y la instalación de puntos de recarga,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii>.
- [4] Red eléctrica, «Mapa Reve,» [En línea]. Available: [mapareve.es/mapa-puntos-recarga](http://mapareve.es/mapa-puntos-recarga).

## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>10</b>
Motivación del proyecto .....	13
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>17</b>
2.1 Infraestructura de recarga .....	17
2.2 Tipos de Vehículos Eléctricos .....	19
2.3 Infraestructura Actual de Electrolineras en España.....	20
2.3.1 Número y distribución.....	20
2.3.2 Crecimiento y cobertura.....	21
2.3.3 Problemas actuales .....	22
2.4 Herramientas de Simulación y Análisis.....	22
2.4.1 Arena Simulation Software .....	23
2.4.1.1 Python/Simpy.....	23
SimPy: Simulación de Eventos Discretos .....	23
2.5 Conclusión.....	24
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión.....</b>	<b>26</b>
3.1 Teoría de Colas y su Aplicación en Electrolineras .....	26
3.1.1 Componentes Fundamentales de un Sistema de Colas.....	26
3.1.2 Modelos de Colas Aplicados a Estaciones de Carga .....	28
3.1.3 Fórmulas Claves en la Teoría de Colas .....	28
3.1.4 Conclusión .....	30
3.2 Herramientas de simulación aplicadas a la gestión de electrolineras.....	30
3.2.1 Simulación por eventod discretos (DES) .....	30
3.2.2 Estudios representativos.....	31
3.3 Tecnologías y Herramientas para la Gestión de Electrolineras .....	33
3.3.1 Sistemas de Gestión de Carga .....	33
3.3.2 Modelos de Optimización de Colas.....	37
3.3.3 Sistemas de Reserva y Gestión de Turnos.....	38
3.3.4 Integración con Energías Renovables y Almacenamiento de Energía .....	38
3.4 Desafíos Futuros .....	39
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>40</b>

Justificación .....	40
Objetivos.....	40
Metodología.....	41
Planificación y Estimación Económica.....	43
<i>Presupuesto</i> .....	43
<i>Flujo de caja proyectado (3 años)</i> .....	44
<i>Rentabilidad</i> .....	44
<i>Conclusión</i> .....	45
<b>Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....</b>	<b>46</b>
Análisis del Sistema.....	46
<i>Entradas de la simulación</i> .....	46
<i>Resultados de la simulación</i> .....	51
<b>Capítulo 6. Implementación.....</b>	<b>57</b>
<i>Cálculo de datos de entrada</i> .....	58
Diseño.....	66
<i>Análisis inicial aplicando teoría de colas</i> .....	66
<i>Comprobación Arena</i> .....	68
<b>Capítulo 7. Análisis de Resultados.....</b>	<b>77</b>
7.1 <i>Objetivo de análisis</i> .....	77
7.2 <i>Enfoque metodológico</i> .....	77
7.3 <i>Comparación de configuraciones</i> .....	78
7.4 <i>Configuraciones óptimas y análisis detallado</i> .....	85
7.4.1 <i>Configuración 1×50 kW + 2×100 kW</i> .....	86
7.4.2 <i>Configuración 2×100 kW</i> .....	86
7.4.3 <i>Configuración 1×350 kW</i> .....	87
7.5 <i>Discusión e implicaciones</i> .....	88
7.6 <i>Conclusiones</i> .....	89
<b>Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>	<b>91</b>
<b>Capítulo 9. Bibliografía.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>99</b>

*ANEXO II 101*

*ANEXO III 106*

## *Índice de figuras*

Figura 1. Puntos de carga instalados para vehículos ligeros públicos y privados por clasificación de potencia (público) y por tipo (privado) en Europa, 2015-2023 [3].	11
Figura 2. Ingresos de las estaciones de carga pública en España entre 2016 y 2022, con una proyección hasta 2028 (en millones de euros) [1].	13
Figura 3. Distribución de los puntos de recarga de acceso público en España por comunidades autónomas en 2023 [6].	15
Figura 4. Mapa de puntos de recarga públicos en España. [14].	21
Figura 5. Volumen anual de cargadores públicos de corriente alterna en España del 2020 al 2023 en función de su potencia [1].	22
Figura 6. Esquema de los componentes fundamentales de un Sistema de Colas.	27
Figura 7. Proceso dinámico de asignación de vehículos eléctricos a estaciones de carga utilizando modelo Multinomial Logit [21].	32
Figura 8. Diagrama de flujo del modelo de simulación Monte Carlo para la estimación de la demanda de recarga de vehículos eléctricos [22].	33
Figura 9. Esquema de la solución propuesta, para la carga de VE en garajes y grandes aparcamientos [24].	35
Figura 10. Diagrama de flujo para la gestión de la llegada de VE.	50
Figura 11. Ubicación seleccionada para el caso de estudio: tramo de la A-4 próximo a Aranjuez [40].	57
Figura 12. Intensidad Media Diaria (IMD) en 2022 en el emplazamiento del caso de estudio, desglosada por día de la semana y mes.	58
Figura 13. Configuración de parámetros de replicación para la simulación del caso de estudio en Arena Simulation.	69
Figura 14. Esquema lógico del modelo de simulación en Arena utilizado para la primera comprobación.	70
Figura 15. Configuración de cargadores utilizada en la simulación de la primera comprobación.	70

---

Figura 16. Esquema lógico del modelo de simulación en Arena utilizado para la segunda comprobación .....	72
Figura 17. Configuración de cargadores utilizada en la simulación de la segunda comprobación .....	72
Figura 18. Esquema lógico del modelo de simulación en Arena utilizado para la tercera comprobación .....	74
Figura 19. Configuración de cargadores utilizada en la simulación de la tercera comprobación .....	74
Figura 20. Relación entre ROI y tasa de abandono en cada caso analizado.....	81
Figura 21. Relación entre el tiempo de espera y la tasa de abandono en configuraciones simuladas .....	82
Figura 22. Relación entre el coste de inversión inicial y el beneficio neto anual para cada una de las configuraciones evaluadas.....	83
Figura 23. Rentabilidad anual (ROI) obtenida en cada configuración simulada.....	84

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Costes de desarrollo del programa y puesta en producción .....	43
Tabla 2. Costes anuales de operación y mantenimiento del servicio .....	44
Tabla 3. Proyección trianual de ingresos, gastos y flujo neto .....	44
Tabla 4. Indicadores clave de rentabilidad del proyecto .....	45
Tabla 5. Parámetros técnicos y económicos de los tipos de cargadores seleccionados. ....	47
Tabla 6. Distribución de llegada de vehículos y demanda media de recarga.....	47
Tabla 7. Parámetros globales de la simulación.....	47
Tabla 8. Tiempos medios de llegada entre dos vehículos consecutivos por día de la semana y mes del año (en minutos).....	48
Tabla 9. Parámetros económicos de la simulación.....	48
Tabla 10. Precio de compra de electricidad según día de la semana y mes del año.....	49
Tabla 11. Resultados globales de atención y abandono de vehículos eléctricos.....	51
Tabla 12. Tiempos globales en el sistema de recarga.....	51
Tabla 13. Métricas de espera y longitud de cola .....	52
Tabla 14. Análisis de servicio prestado por tipo de coche eléctrico.....	52
Tabla 15. Indicadores operativos de carga y utilización de la infraestructura .....	53
Tabla 16. Energía total suministrada desglosada por tipo de cargador, tipo de vehículo, día de la semana y mes del año .....	54
Tabla 17. Comportamiento operativo por tipo de cargador.....	54
Tabla 18. Resultados económicos anuales y rentabilidad del sistema .....	55
Tabla 19. Intensidad Media Diaria (IMD) de vehículos por día de la semana y mes del año en 2022 .....	60
Tabla 20. Estimación de la Intensidad Media Diaria (IMD) de vehículos por día de la semana y mes del año en 2030 .....	61
Tabla 21. Estimación de la IMD de vehículos eléctricos por día de la semana y mes del año en 2030 .....	61

Tabla 22. Estimación del número de vehículos eléctricos que requieren recarga diaria en 2030 .....	62
Tabla 23. Tiempo medio estimado entre la llegada de dos vehículos eléctricos consecutivos por día y mes en 2030.....	62
Tabla 24. Configuración de cargadores definida para el caso de estudio.....	63
Tabla 25. Tipología de vehículos eléctricos considerada en el caso de estudio.....	64
Tabla 26. Parámetros generales de simulación definidos para el caso de estudio.....	64
Tabla 27. Parámetros económicos utilizados en la simulación del caso de estudio.....	65
Tabla 28. Comparación de resultados entre Arena y Python en la primera comprobación	71
Tabla 29. Comparación de resultados entre Arena y Python en la segunda comprobación	73
Tabla 30. Comparación de resultados entre Arena y Python en la tercera comprobación ..	75
Tabla 31. Indicadores clave de rendimiento para cada configuración de infraestructura simulada.....	80
Tabla 32. CAPEX por configuración .....	83

## *Índice de ecuaciones*

Ecuación 1. Ley de Little.....	28
Ecuación 2. Número esperado de clientes en el sistema .....	29
Ecuación 3. Número esperado de clientes en la cola.....	29
Ecuación 4. Tiempo promedio en el sistema.....	29
Ecuación 5. Tiempo promedio en la cola .....	29
Ecuación 6. Factor de utilización del sistema .....	29
Ecuación 7. Energía necesaria para cargar un vehículo .....	49
Ecuación 8. Tiempo que tarda de media en cargarse cada vehículo .....	50
Ecuación 9. Desviación típica del tiempo de carga .....	50
Ecuación 10. Cálculo de los ingresos anuales en función de la energía suministrada y el precio de venta por tipo de cargador .....	55
Ecuación 11. Cálculo del coste de inversión (CAPEX) por cargador en función de su potencia.....	55
Ecuación 12. Composición de los costes anuales de operación de la electrolinera.....	55
Ecuación 13. Cálculo de la amortización anual del CAPEX.....	56
Ecuación 14. Cálculo del beneficio neto anual.....	56
Ecuación 15. Cálculo de la rentabilidad sobre la inversión (ROI) .....	56
Ecuación 16. Probabilidad de carga en función de la distancia entre electrolineras y la autonomía del vehículo.....	59
Ecuación 17. Cálculo de la probabilidad media de carga ponderada según la distribución del parque de vehículos eléctricos.....	59
Ecuación 18. Cálculo de la energía demandada por un vehículo eléctrico en función de su batería .....	66
Ecuación 19. Cálculo del tiempo estimado de carga en función de la energía demandada y la potencia del cargador.....	67
Ecuación 20. Cálculo de la proporción de cada tipo de cargador sobre el total de la infraestructura.....	67

Ecuación 21. Cálculo del tiempo medio de carga ponderado y tasa de servicio del sistema .....	67
Ecuación 22. Tiempo promedio en el sistema .....	67
Ecuación 23. Tiempo promedio en la cola .....	68

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

La rápida expansión de los vehículos eléctricos (VE) está revolucionando el transporte y generando una demanda urgente de infraestructuras de carga accesibles y eficientes. La infraestructura actual en países como España ha avanzado, pero aún no alcanza el ritmo necesario para soportar el incremento esperado en la circulación de VE [1]. Para 2030, se estima que el número de puntos de carga debería multiplicarse por el crecimiento exponencial del parque de VE, la necesidad de reducir los tiempos de espera en puntos de carga y el cumplimiento de objetivos ambientales y normativas europeas de sostenibilidad para cumplir con los objetivos de accesibilidad y sostenibilidad establecidos en las normativas europeas [2].

La planificación y el desarrollo de electrolineras plantean varios desafíos, no solo técnicos sino también logísticos, para gestionar la carga de vehículos de manera eficiente. Investigaciones recientes en distintos países sugieren la importancia de evaluar cuidadosamente los requisitos energéticos en función de los patrones de uso y tráfico en vías clave [3].

En este contexto, la gestión de colas es una herramienta esencial para gestionar la demanda previsible permitiendo una respuesta más precisa a las necesidades de los conductores y optimizando el uso de la red de carga y el servicio a los usuarios. Esta planificación debe considerar factores locales como el clima, los hábitos de viaje y las preferencias de carga, que afectan directamente a la demanda. Por ejemplo, la estacionalidad y los patrones de tráfico durante los fines de semana y periodos vacacionales influyen en el grado de utilización. Asimismo, la implantación gradual y estratégica de puntos de carga, tomando en cuenta las capacidades actuales y futuras de la red, es clave para entender este crecimiento de manera sostenible. Se ha identificado que la localización estratégica de los puntos de recarga, especialmente en zonas interurbanas y zonas de alto tránsito, es fundamental para optimizar la utilización de la infraestructura y satisfacer la demanda creciente [4].

Installed public and private light-duty vehicle charging points by power rating (public) and by type (private), 2015-2023

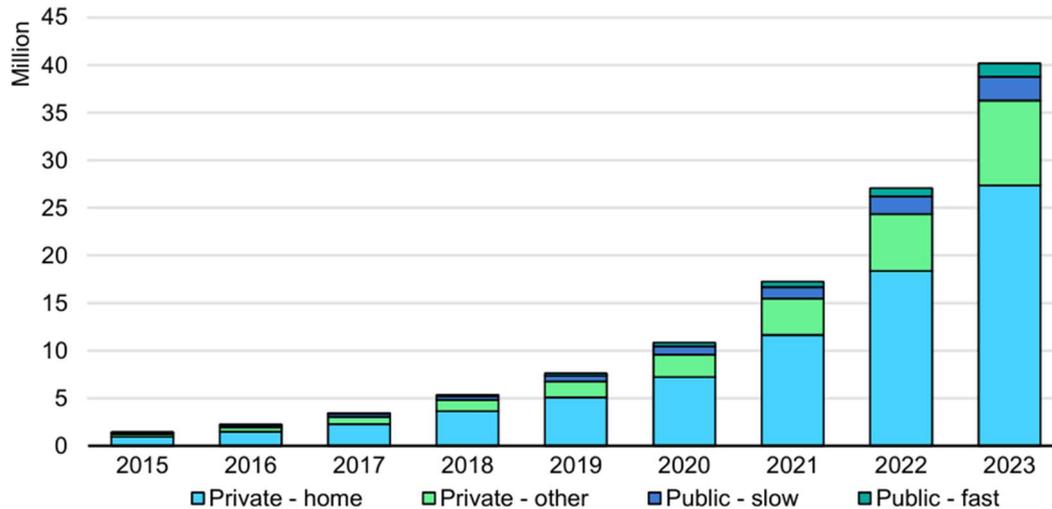


Figura 1. Puntos de carga instalados para vehículos ligeros públicos y privados por clasificación de potencia (público) y por tipo (privado) en Europa, 2015-2023 [3].

En la Figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar un aumento significativo, especialmente en cargadores privados para el hogar y públicos de carga rápida, destacando el fuerte impulso en la infraestructura de carga en los últimos años.

El desarrollo tecnológico en los sistemas de recarga ha permitido reducir considerablemente los tiempos de carga, sin embargo, esto también ha producido un incremento en el grado de complejidad de la gestión energética. Las diferentes tecnologías implantadas permiten la monitorización en tiempo real y el ajuste dinámico de la potencia suministrada. Esto es la clave que permite optimizar el rendimiento de las electrolinerías garantizando a su vez la seguridad de la red eléctrica [2].

El desarrollo acelerado de infraestructuras de recarga para VE supone un desafío importante para las redes eléctricas, tanto a nivel de distribución como de generación. La creciente concentración de puntos de carga, especialmente en electrolinerías de carga rápida, puede generar picos de demanda elevados que incrementan la carga sobre la red y podrían derivar en congestión o necesidad de reforzar la infraestructura existente. Este impacto es especialmente relevante en áreas urbanas con una red de distribución que ya opera al límite

y en zonas rurales con capacidad limitada de suministro. Para mitigar estos efectos, se están implementando estrategias como la carga gestionada, que permite ajustar dinámicamente la potencia suministrada en función de la disponibilidad de energía, y el uso de sistemas de almacenamiento en baterías para absorber picos de demanda y mejorar la seguridad del suministro. Asimismo, la integración de generación distribuida, como la energía solar fotovoltaica en electrolineras, puede contribuir a reducir la presión sobre la red y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico. Sin una planificación adecuada, la rápida expansión de estas infraestructuras podría acelerar la necesidad de inversiones en refuerzo de redes de media y baja tensión, así como en sistemas de gestión avanzada para equilibrar la oferta y la demanda de energía. [3]

Un aspecto importante de las electrolineras a considerar es su coste, tanto en lo relativo a la instalación como a la operación. La viabilidad económica de estas infraestructuras depende de distintos factores entre los que se encuentran el volumen de clientes, la eficiencia operativa o las ayudas gubernamentales. Un ejemplo destacado de estas ayudas es el Programa MOVES III, financiado por los fondos Next Generation EU de la Unión Europea, que tiene como objetivo impulsar la movilidad sostenible y la transición energética. Este programa, gestionado en España por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), incluye ayudas directas para la instalación de puntos de recarga de VE, tanto en vías públicas como en zonas privadas, con el fin de reducir la carga financiera para los operadores y acelerar la expansión de la infraestructura de recarga en todo el país. [3] la viabilidad operativa y económica de las electrolineras.

En este proyecto, se desarrolla un modelo de simulación en Python para optimizar la gestión de colas en electrolineras, abordando un desafío clave en la transición hacia la movilidad eléctrica. Ante el crecimiento del parque de VE y la expansión de las estaciones de carga pública, resulta fundamental mejorar la eficiencia operativa, reducir tiempos de espera y maximizar la satisfacción del usuario. Para ello, se ha empleado la librería SimPy, especializada en simulación en eventos discretos, permitiendo analizar y ajustar la infraestructura bajo distintos escenarios de demanda. Además, el Arena Simulation Software se ha utilizado como herramienta de contraste para validar los resultados obtenidos. Este

enfoque busca facilitar la toma de decisiones estratégicas sobre la ubicación y capacidad de los puntos de recarga, contribuyendo a una infraestructura más eficiente y adaptable a las necesidades de los usuarios.

## MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La electrificación del transporte es un tema de gran interés en la actualidad debido a su impacto en la eficiencia energética, la reducción de la contaminación local y global, la mejora de la calidad de vida y los avances tecnológicos. En este contexto, la movilidad eléctrica está ganando protagonismo, lo que plantea nuevos desafíos para la infraestructura de recarga. En particular, las compañías que gestionan electrolinerías deben optimizar la administración del flujo de vehículos y reducir los tiempos de espera, asegurando un servicio eficiente que se adapte al creciente volumen de llegadas.

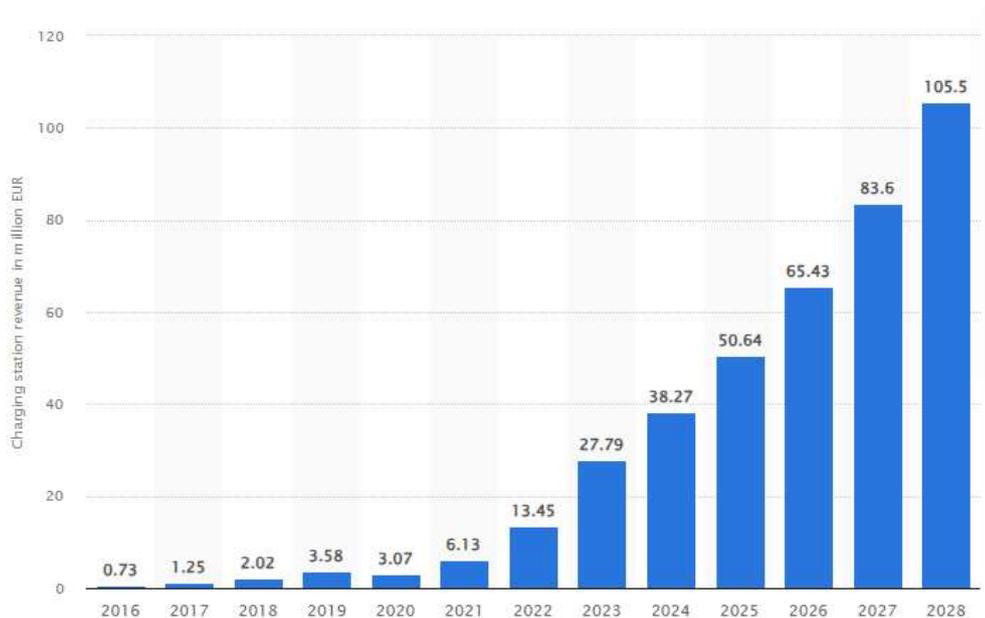


Figura 2. Ingresos de las estaciones de carga pública en España entre 2016 y 2022, con una proyección hasta 2028 (en millones de euros) [1]

El crecimiento del parque de VE debe ir acompañado del desarrollo simultáneo de la infraestructura de recarga para garantizar una transición eficiente y sostenible. Se prevé que los ingresos por estaciones de carga públicas en España alcancen los 120 millones de euros

en 2028, como se muestra en la Figura 2, reflejando no solo el aumento en la adopción de estos vehículos, sino también la necesidad de una red de recarga adecuada. Esta interdependencia entre VE y electrolineras también impacta la planificación de las redes eléctricas, ya que, sin una infraestructura de carga suficiente, la movilidad eléctrica no puede expandirse, y sin una demanda significativa, la inversión en puntos de recarga pierde atractivo.

Para que el despliegue de electrolineras se realice de manera eficiente y bien planificada, es fundamental prever con precisión la demanda de recarga de VE. Estas previsiones deben considerar tanto el consumo agregado de energía en diferentes escalas de tiempo (diaria, semanal, mensual o anual) como su distribución a lo largo del día. Este conocimiento permite no solo dimensionar adecuadamente la infraestructura, sino también desarrollar modelos de gestión que optimicen la explotación de las estaciones de carga, asegurando su eficiencia operativa y la satisfacción del usuario.

La necesidad de optimizar la gestión de colas en electrolineras radica en varios factores clave. En primer lugar, la infraestructura actual de recarga en muchos países, incluida España, es insuficiente para cubrir la demanda creciente. Esto genera cuellos de botella en las estaciones de recarga, especialmente en momentos de alta demanda, como los fines de semana o durante las vacaciones. La implementación de modelos de simulación y análisis de colas puede ayudar a identificar patrones de uso y a desarrollar estrategias para minimizar los tiempos de espera y maximizar la utilización de los recursos disponibles.

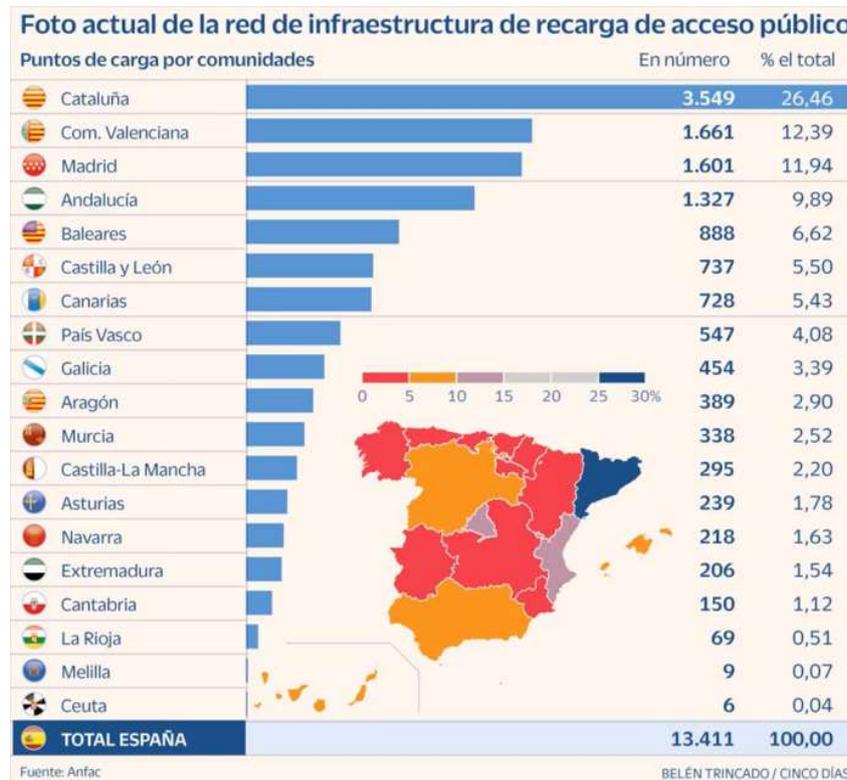


Figura 3. Distribución de los puntos de recarga de acceso público en España por comunidades autónomas en 2023 [6]

La Figura 3 pone de manifiesto la distribución desigual de la infraestructura de recarga de acceso público en España, lo que incide directamente en la probabilidad de formarse colas en determinadas regiones. A medida que el parque de VE continúa en expansión, esta heterogeneidad se traduce en un reto para la planificación y la gestión de las recargas.

Además, la eficiencia en la gestión de colas no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también impacta directamente en la rentabilidad de las electrolinerías. Un sistema de recarga eficiente puede atraer a más usuarios y fidelizarlos, lo que incrementa los ingresos y justifica la inversión en infraestructuras de mayor capacidad. Por otro lado, una mala gestión puede disuadir a los usuarios de utilizar el servicio, afectando negativamente la viabilidad económica de las estaciones.

A partir de todo este conocimiento, será posible planificar el ritmo de las inversiones y definir políticas comerciales que optimicen la atención al cliente, garantizando tiempos de

servicio adecuados y evitando esperas innecesarias. Además, el desarrollo de aplicaciones inteligentes para la gestión de la demanda, como reservas anticipadas o programas para clientes preferentes, debe basarse en un análisis detallado del comportamiento de los usuarios para maximizar la eficiencia del sistema.

Este proyecto también busca contribuir a la sostenibilidad ambiental al facilitar la adopción del vehículo eléctrico. Al optimizar la infraestructura de recarga, se reduce uno de los principales obstáculos para la transición hacia una movilidad más limpia y eficiente. La movilidad eléctrica es una pieza clave en la lucha contra el cambio climático, y mejorar la infraestructura de recarga es esencial para su éxito.

En conclusión, el estudio de la dinámica de las colas en las electrolineras es un aspecto importante para el desarrollo eficiente de la infraestructura de recarga y la optimización de la experiencia del usuario. El interés de este trabajo radica en la comprensión y modelado de la demanda, facilitando la planificación de inversiones y estrategias de gestión que garanticen la viabilidad económica de las estaciones y contribuyan a la transición hacia un modelo de transporte más sostenible. Este estudio trata de contribuir al conocimiento y desarrollo de la movilidad eléctrica en el siglo XXI, concretándose en el desarrollo de un modelo de simulación.

## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

En esta sección se incluye una descripción del estado actual de la infraestructura de recarga, los tipos de cargadores y VE, así como la evolución del número de electrolineras. Con esta base, se proporciona un contexto completo que conecta el análisis tecnológico con los objetivos del proyecto.

### **2.1 INFRAESTRUCTURA DE RECARGA**

La infraestructura de recarga es un elemento clave para el desarrollo de la movilidad eléctrica, ya que su capacidad (potencia y número de cargadores) y distribución influyen directamente en la experiencia del usuario y en la adopción del VE. Actualmente, esta infraestructura está en expansión, impulsada por el aumento del parque automovilístico eléctrico y el crecimiento de las estaciones de carga rápida, especialmente en rutas estratégicas y zonas urbanas [7].

En el mercado existen diversos tipos de cargadores según su potencia y tecnología. Los cargadores en corriente alterna (AC) son los más comunes en entornos residenciales y comerciales, utilizados principalmente para recargas domésticas y semirrápidas. Estos cargadores operan con potencias que varían entre 3,7 kW y 22 kW, permitiendo tiempos de recarga que oscilan entre 4 y 12 horas, dependiendo de la capacidad de la batería del vehículo. Su principal ventaja radica en su menor coste de instalación y la compatibilidad con la red eléctrica existente, lo que facilita su adopción en hogares, estacionamientos privados y centros comerciales [8].

Sin embargo, la creciente demanda de estaciones de carga de alta potencia en vías urbanas e interurbanas ha impulsado la adopción de cargadores en corriente continua (DC), los cuales permiten una recarga mucho más rápida. Estos cargadores, empleados en electrolineras y puntos estratégicos de carga pública, pueden alcanzar potencias superiores a 350 kW, reduciendo significativamente los tiempos de espera para los usuarios. Dentro de esta categoría, los cargadores con estándar CCS2 (Combined Charging System) se han

consolidado como el principal sistema de carga en Europa debido a su compatibilidad con múltiples modelos de VE y a que permiten carga rápida y ultrarrápida [3]. Se considera carga rápida aquella que proporciona entre 50 kW y 150 kW, permitiendo recargar un vehículo en menos de una hora, mientras que la carga ultrarrápida supera los 150 kW, reduciendo el tiempo de carga a pocos minutos, lo que resulta ideal para estaciones de alta rotación.

Además, para dar respuesta a las necesidades específicas del transporte pesado, se están desplegando cargadores con el estándar MCS (Megawatt Charging System), capaces de alcanzar potencias de hasta 1000 kW (1 MW). Estos sistemas están diseñados para camiones eléctricos, autobuses de largo recorrido y otros vehículos industriales, permitiendo una recarga rápida incluso con baterías de gran capacidad [9].

En este trabajo, en el caso de estudio, se emplearán específicamente cargadores CCS2 de 50kW, 100 kW, 200kW y 350 kW, ya que son los más adecuados para simular escenarios de alta rotación y satisfacer la demanda esperada en estaciones de carga de uso intensivo.

Además del CCS2, existen otros estándares de carga en el mercado, como CHAdeMO [10], ampliamente utilizado en Asia y compatible con potencias de hasta 400 kW en su última versión, y los Superchargers de Tesla, diseñados específicamente para los vehículos de la marca. No obstante, CCS2 se ha convertido en la opción predominante en Europa debido a su interoperabilidad con distintos fabricantes y su apoyo por parte de regulaciones europeas que buscan la estandarización de la infraestructura de carga [11].

Pese al avance en la instalación de puntos de recarga, aún existen retos como la saturación en horas pico, especialmente en épocas de alta movilidad, y la desigual distribución geográfica, que limita el acceso en zonas rurales. No obstante, la tendencia actual es ampliar la infraestructura de carga rápida y ultrarrápida, con el objetivo de agilizar el proceso de recarga y mejorar la experiencia del usuario [12]. Este contexto es fundamental para entender la importancia de optimizar la gestión de colas en las electrolineras y justificar el enfoque adoptado en este proyecto.

## 2.2 TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El parque de VE es diverso y cada categoría presenta necesidades de recarga específicas, lo que influye directamente en la demanda y en la gestión de colas en las electrolinerías. Según su sistema de propulsión, los VE se clasifican en vehículos eléctricos de batería (BEV), que funcionan exclusivamente con energía almacenada en baterías recargables; vehículos híbridos enchufables (PHEV), que combinan un motor de combustión interna con uno o más motores eléctricos y pueden recargarse mediante una fuente externa de electricidad; y vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV), que utilizan hidrógeno para generar electricidad a través de una pila de combustible. A su vez, dentro de estas categorías, los VE se diferencian por su tamaño y uso: i) los vehículos ligeros, como motocicletas y ciclomotores, están diseñados para desplazamientos urbanos y de corta distancia; ii) los vehículos medianos, que incluyen automóviles y SUV, están destinados al transporte de pasajeros en entornos urbanos y suburbanos; y iii) los vehículos pesados, como autobuses y camiones, se emplean en el transporte de pasajeros y mercancías en largas distancias. Esta clasificación es clave para comprender las distintas necesidades de recarga y planificar adecuadamente la infraestructura en las electrolinerías.

Los vehículos medianos incluyen turismos, berlinas y SUV, y representan la mayor parte del parque vehicular eléctrico. En el caso de estudio de este trabajo, se han aproximado tres tipos principales de vehículos medianos según la capacidad de sus baterías: 40 kWh, 70 kWh y 120 kWh, basándose en las capacidades actuales de modelos representativos del mercado. Por ejemplo, vehículos urbanos como el Nissan Leaf utilizan baterías de 40 kWh, mientras que berlinas como el Tesla Model Y emplean baterías cercanas a los 70 kWh. Para autonomías más largas, modelos premium como el Tesla Model S incorporan baterías de hasta 100 kWh [13].

Los vehículos pesados, como camiones y autobuses, tienen un impacto significativo en la demanda de carga debido a sus baterías de gran capacidad y su uso intensivo. Estos vehículos suelen incorporar baterías de 300 kWh o superiores, con autonomías medias de 400 km [4].

Además, su carga se realiza preferentemente con cargadores de alta potencia, como los MCS (Megawatt Charging System), que pueden suministrar hasta 1000 kW [12].

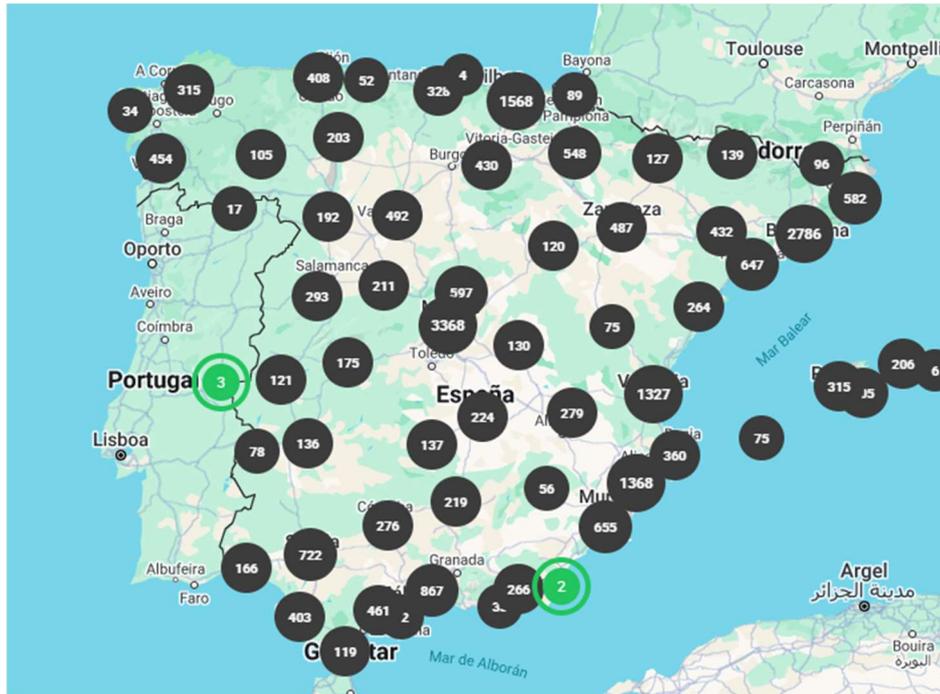
Los vehículos híbridos enchufables (PHEV) combinan un motor eléctrico con uno de combustión. Realizan recargas más breves, generalmente utilizando cargadores semirápidos y preferentemente no en ruta, sino en los lugares de origen y destino. Su menor dependencia de la recarga rápida reduce su impacto en la formación de colas de espera [4].

En este proyecto, se han considerado estas tipologías de vehículos para modelar de forma realista el flujo del caso de estudio en la electrolinera. Además, se ha ajustado el consumo y el tiempo de carga según la capacidad de la batería, diferenciando el impacto de los diferentes tipos de vehículos. Esta segmentación es esencial para evaluar el rendimiento de los cargadores seleccionados y para identificar posibles cuellos de botella en la infraestructura de recarga.

## **2.3 INFRAESTRUCTURA ACTUAL DE ELECTROLINERAS EN ESPAÑA**

### ***2.3.1 Número y distribución***

En España, la infraestructura de electrolineras ha crecido significativamente en los últimos años. Actualmente, se estima que a fecha mayo de 2025 hay más de 22.000 puntos de recarga públicos, con una mayor concentración en comunidades como Madrid, Cataluña y Andalucía [5]. Sin embargo, la distribución es desigual, ya que en zonas rurales y algunas carreteras secundarias aún hay escasez de puntos de recarga [2].

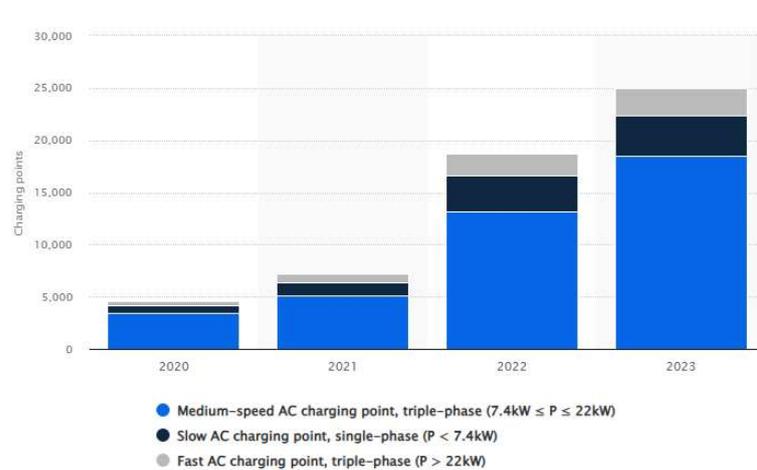


*Figura 4. Mapa de puntos de recarga públicos en España. [14]*

El mapa de la Figura 4 muestra una alta concentración de puntos de carga en núcleos urbanos y principales ejes de transporte, especialmente en la costa mediterránea y el eje Madrid-Barcelona. Sin embargo, en el interior y el noroeste de la península la cobertura es menor, evidenciando la necesidad de ampliar la infraestructura para garantizar una distribución más equitativa y fomentar la movilidad eléctrica en todo el país.

### **2.3.2 Crecimiento y cobertura**

El crecimiento de la infraestructura de recarga se ha visto impulsado por el Plan MOVES del Gobierno y las exigencias de la normativa europea. El objetivo es alcanzar al menos 100.000 puntos de recarga públicos para 2030 [2]. Se están priorizando rutas estratégicas para VE en autovías y carreteras nacionales, con cargadores rápidos y ultrarrápidos para facilitar viajes de largo recorrido [5]. Como muestra la Figura 5, entre 2020 y 2023 se ha producido un incremento notable en el número de puntos de recarga, especialmente en los de velocidad media ( $7.4 \text{ kW} \leq P \leq 22 \text{ kW}$ ), aunque también crecen los cargadores rápidos.



*Figura 5. Volumen anual de cargadores públicos de corriente alterna en España del 2020 al 2023 en función de su potencia [1]*

### 2.3.3 Problemas actuales

Pese al avance, persisten problemas como colas y saturación en horas pico, especialmente en zonas urbanas y áreas de servicio durante periodos vacacionales. La falta de interoperabilidad y los tiempos prolongados de espera son obstáculos relevantes. Además, la cobertura en áreas rurales sigue siendo insuficiente, lo que dificulta la expansión del uso de VE más allá de los núcleos urbanos [2].

## 2.4 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

Para evaluar el funcionamiento de una electrolinera y su capacidad de respuesta ante distintos niveles de demanda, se han empleado herramientas especializadas en simulación y análisis de datos. Inicialmente, se trabajó con Arena Simulation Software, que permitió modelar visualmente los procesos de carga, los tiempos de espera y la ocupación de los cargadores. Sin embargo, su uso presentaba limitaciones en cuanto a la flexibilidad en la personalización de los datos de entrada y la integración con fuentes externas, lo que llevó a la decisión de migrar la simulación principal a Python, donde se cuenta con mayor versatilidad y capacidad de ajuste. No obstante, Arena se ha seguido utilizando como herramienta de chequeo y validación para comprobar los resultados obtenidos en Python y garantizar la fiabilidad del modelo.

### **2.4.1 Arena Simulation Software**

Arena es un software desarrollado por Rockwell Automation para la simulación de eventos discretos, ampliamente utilizado en la industria para modelar procesos donde intervienen colas, asignación de recursos y toma de decisiones basada en eventos [15]. Su funcionamiento se basa en la representación gráfica de los distintos elementos del sistema, permitiendo definir la llegada de entidades, la gestión de recursos limitados y el paso por distintas fases del proceso. En este caso, ha sido empleado para modelar la llegada de VE a la electrolinera, la espera en la cola cuando los cargadores estaban ocupados y la posterior asignación de un punto de carga.

El uso de Arena ha sido útil para visualizar la dinámica de la electrolinera y evaluar distintos escenarios con diferentes configuraciones de infraestructura. Sin embargo, la necesidad de realizar simulaciones más personalizadas y trabajar con datos externos llevó a buscar una alternativa más flexible.

#### **2.4.1.1 Python/Simpy**

En particular, se ha trabajado con SimPy, una librería de Python, diseñada específicamente para la simulación de procesos estocásticos donde los eventos ocurren en momentos específicos del tiempo y afectan la dinámica del sistema [16]. SimPy, de la misma forma que Arena, permite modelar cada elemento del sistema, como los VE, los cargadores y las colas de espera, como procesos independientes que interactúan entre sí en una línea de tiempo controlada por eventos.

#### **SimPy: Simulación de Eventos Discretos**

SimPy es una librería basada en la programación orientada a procesos, donde cada entidad dentro de la simulación se modela como un proceso independiente que evoluciona en función del tiempo y de eventos específicos [16]. En este caso, los VE que llegan a la electrolinera han sido modelados como procesos que solicitan un recurso (cargador), esperan su turno si es necesario y luego realizan la carga antes de abandonar el sistema.

En la simulación, cada vehículo eléctrico es tratado como un proceso que entra en el sistema en un momento determinado, espera en caso de que los cargadores estén ocupados, inicia su carga cuando uno queda disponible y finalmente abandona la electrolinera. La gestión de los cargadores ha sido implantada utilizando los mecanismos de control de recursos de SimPy, los cuales permiten asignar los puntos de carga a los vehículos y registrar los tiempos de espera en la cola. A través de múltiples escenarios, se han podido analizar distintos escenarios, variando la cantidad de cargadores disponibles y evaluando cómo afecta esta variable a la eficiencia operativa del sistema.

Gracias a la combinación de SimPy y librerías auxiliares, ha sido posible elaborar una simulación flexible y personalizable, en la que se pueden modificar los parámetros de entrada de manera sencilla para evaluar distintos escenarios sin restricciones impuestas por interfaces gráficas predefinidas. El modelo permite realizar simulaciones detalladas, integrando datos externos y generando resultados precisos para el análisis del funcionamiento de la electrolinera. No obstante, Arena ha seguido desempeñando un papel importante en la validación del modelo, permitiendo contrastar los resultados obtenidos y garantizar la coherencia del sistema en distintas configuraciones.

## **2.5 CONCLUSIÓN**

El desarrollo de la movilidad eléctrica está estrechamente vinculado a la evolución de la expansión de las electrolineras, la diversificación del parque de VE y la expansión de las redes eléctricas. Este trabajo ha analizado en detalle varios de estos aspectos, destacando los avances y desafíos que enfrentan las estaciones de carga y proponiendo herramientas de simulación para analizar su operación.

En la actualidad, se observa un crecimiento significativo en la instalación de puntos de carga, especialmente en rutas estratégicos y entornos urbanos, con una tendencia hacia el aumento de cargadores rápidos y ultrarrápidos que permitan reducir los tiempos de espera.

El parque de VE también influye en la demanda de recarga, pues además del número total de VE, es importante considerar la cantidad específica de vehículos que hay de cada tipo, ya

que cada categoría requiere distintos tiempos y potencias de carga. Este análisis ha permitido modelar de manera realista la variabilidad en la demanda de las estaciones de carga y entender cómo el tipo de vehículo afecta la saturación de las infraestructuras de recarga.

Sin embargo, su distribución sigue siendo desigual, concentrándose en comunidades como Madrid, Cataluña y Andalucía, mientras que las zonas rurales presentan carencias significativas. Además, aunque las políticas de incentivo han favorecido la expansión de la red, aún persisten problemas como la interoperabilidad entre redes, la falta de cargadores en ubicaciones estratégicas y los tiempos de espera en periodos de alta demanda.

## Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La creciente adopción de VE ha puesto de manifiesto la necesidad de una gestión eficiente de las electrolineras para garantizar una experiencia óptima del usuario y un uso adecuado de los recursos. Ante esta situación, resulta necesario contar con herramientas que permitan modelar y analizar el funcionamiento de las electrolineras de forma realista. En este apartado se revisan los fundamentos de la teoría de colas, las principales metodologías de simulación aplicadas al problema, las tecnologías disponibles y los desafíos futuros, sentando las bases para el desarrollo de un modelo que contribuya a la mejora de la gestión de estas infraestructuras.

### 3.1 TEORÍA DE COLAS Y SU APLICACIÓN EN ELECTROLINERAS

La teoría de colas es una disciplina matemática que estudia el comportamiento de las líneas de espera en sistemas donde la demanda de servicio puede superar temporalmente la capacidad disponible [17]. Esta teoría se ha aplicado con éxito en diversos campos, como las telecomunicaciones, la logística y, más recientemente, en la gestión de estaciones de carga para VE. En este contexto, la teoría de colas permite optimizar el funcionamiento de las electrolineras, mejorar la experiencia del usuario y garantizar un uso eficiente de los recursos disponibles

#### 3.1.1 Componentes Fundamentales de un Sistema de Colas

Un sistema de colas se compone de varios elementos clave que definen su comportamiento y eficiencia:

1. **Proceso de Llegada:**

Describe cómo los clientes (en este caso, VE) llegan al sistema. Frecuentemente, este proceso se modela mediante un **proceso de Poisson**, donde las llegadas son independientes y el tiempo entre ellas sigue una distribución exponencial. Este enfoque es adecuado para capturar la aleatoriedad en la llegada de vehículos a las estaciones de carga.

2. **Proceso de Servicio:**

Define cómo se atiende a los clientes. En el contexto de las estaciones de carga, esto se refiere al tiempo que tarda un vehículo en cargarse, el cual puede seguir diferentes distribuciones estadísticas.

### 3. **Disciplina de la Cola:**

Establece el orden en que los vehículos son atendidos. Las disciplinas más comunes incluyen:

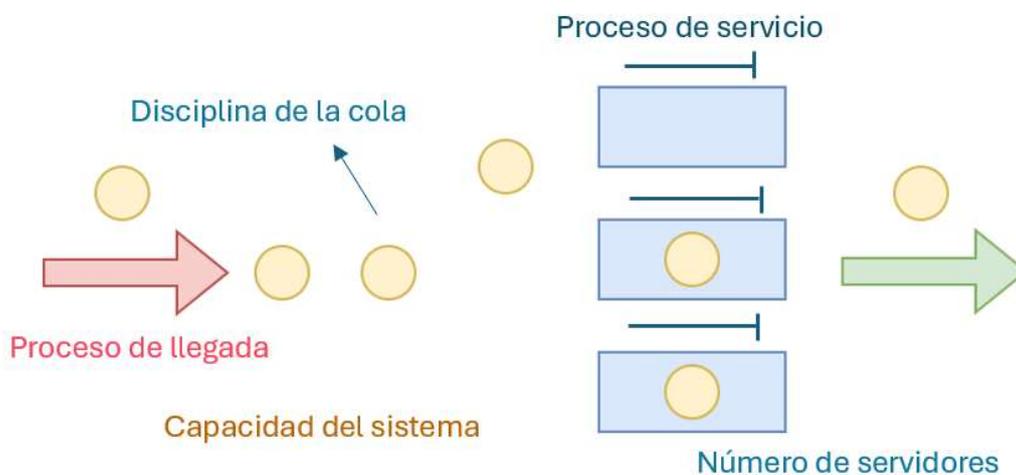
- **FIFO (First In, First Out):** El primer vehículo en llegar es el primero en ser atendido.
- **Sistemas basados en prioridades:** Algunos vehículos (por ejemplo, aquellos que han reservado con anterioridad) pueden recibir atención preferencial.

### 4. **Capacidad del Sistema:**

Indica el número máximo de vehículos que la estación puede manejar simultáneamente, incluyendo aquellos en espera y en servicio. Esta capacidad es un factor crítico para determinar la eficiencia del sistema y evitar la saturación.

### 5. **Número de Servidores:**

Refleja cuántos cargadores están disponibles para atender a los vehículos. En un sistema de colas, el número de servidores (cargadores) influye directamente en la capacidad del sistema para manejar la demanda.



*Figura 6. Esquema de los componentes fundamentales de un Sistema de Colas*

### **3.1.2 Modelos de Colas Aplicados a Estaciones de Carga**

Uno de los modelos más utilizados para analizar estaciones de carga es el **M/M/c**, donde:

- **M**: Las llegadas de vehículos siguen un proceso de Poisson.
- **M**: Los tiempos de carga son exponenciales.
- **c**: Número de cargadores en la estación.

Este modelo permite calcular métricas clave, como:

- La probabilidad de que todos los cargadores estén ocupados.
- La longitud media de la cola.
- El tiempo promedio de espera.

Estas métricas son fundamentales para evaluar la eficiencia del sistema y diseñar estrategias que minimicen los tiempos de espera y maximicen la utilización de los recursos.

### **3.1.3 Fórmulas Claves en la Teoría de Colas**

Para describir el desempeño de los sistemas de colas, se utilizan diversas ecuaciones fundamentales. La teoría de colas se puede aplicar para dimensionar la capacidad de los cargadores en electrolinerías. Considerando que los VE llegan de forma aleatoria, podemos modelar la estación como un sistema de colas M/M/c, donde:  $\lambda$  es la tasa de llegada de vehículos,  $\mu$  es la tasa de servicio (la inversa del tiempo promedio de carga) y  $c$  es el número de cargadores disponibles [18].

- **Ley de Little**

Establece que, en estado estacionario, el número promedio de clientes en el sistema ( $L$ ) es igual a la tasa de llegada ( $\lambda$ ) multiplicada por el tiempo promedio que un cliente pasa en el sistema ( $W$ ).

$$L = \lambda \times W$$

*Ecuación 1. Ley de Little*

- **Número esperado de clientes en el sistema (para un sistema M/M/1)**

Permite conocer la cantidad promedio de clientes en el sistema en cualquier instante de tiempo.

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

*Ecuación 2. Número esperado de clientes en el sistema*

- **Número esperado de clientes en la cola**

Indica cuántos clientes están en espera antes de ser atendidos en promedio.

$$Lq = \frac{\lambda^2}{\mu (\mu - \lambda)}$$

*Ecuación 3. Número esperado de clientes en la cola*

- **Tiempo promedio en el sistema**

Representa el tiempo total que un cliente pasa en el sistema, incluyendo espera y servicio.

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

*Ecuación 4. Tiempo promedio en el sistema*

- **Tiempo promedio en la cola**

Tiempo medio que un cliente permanece en la cola antes de recibir servicio.

$$Wq = \frac{\lambda}{\mu (\mu - \lambda)}$$

*Ecuación 5. Tiempo promedio en la cola*

- **Factor de utilización del sistema**

Mide el grado de ocupación de los servidores; valores cercanos a 1 indican alta congestión.

$$\rho = \frac{\lambda}{c \times \mu}$$

*Ecuación 6. Factor de utilización del sistema*

### **3.1.4 Conclusión**

La aplicación de la teoría de colas en estaciones de carga de VE permite optimizar la asignación de recursos y mejorar la experiencia del usuario. Al comprender y modelar las dinámicas de llegada y servicio, es posible diseñar estrategias que minimicen los tiempos de espera y maximicen la eficiencia operativa.

## **3.2 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN APLICADAS A LA GESTIÓN DE ELECTROLINERAS**

La creciente complejidad en la operación de estaciones de carga, junto con la variabilidad en la demanda y el comportamiento del usuario, ha llevado al uso de herramientas de simulación como complemento a los modelos analíticos clásicos. Estas permiten representar con mayor realismo el funcionamiento del sistema y evaluar distintas estrategias de diseño y gestión [19].

### **3.2.1 Simulación por eventod discretos (DES)**

La simulación se ha consolidado como una herramienta clave para modelar el comportamiento dinámico de sistemas complejos, especialmente en contextos como el diseño y operación de estaciones de carga de vehículos VE. Su capacidad para representar situaciones reales con múltiples variables, incertidumbre y eventos interdependientes la hace especialmente útil frente a métodos puramente analíticos [20].

Entre los distintos enfoques existentes, la simulación por eventos discretos (DES) destaca por su idoneidad para representar sistemas donde los cambios ocurren en puntos específicos del tiempo, como la llegada de vehículos, el inicio y fin de la carga o la liberación de cargadores. Este tipo de simulación es dinámica, ya que modela la evolución del sistema a lo largo del tiempo, y estocástica, al incorporar incertidumbre en variables clave mediante distribuciones de probabilidad (por ejemplo, en los tiempos de llegada o duración de carga). Así, permite obtener una visión más realista del funcionamiento de una estación, capturando tanto la variabilidad de la demanda como las restricciones operativas.

Dado su enfoque orientado a eventos, su capacidad para manejar colas y asignación de recursos, y su realismo probabilista, la simulación por eventos discretos se considera la opción más adecuada para analizar el rendimiento y la eficiencia de infraestructuras de recarga eléctrica.

En este trabajo se ha optado por una simulación por eventos discretos con carácter estocástico y dinámico, al considerar que ofrece el equilibrio adecuado entre realismo, control y capacidad de análisis para estudiar el funcionamiento de una estación de carga eléctrica.

### **3.2.2 Estudios representativos**

Yang et al. desarrollaron un marco de simulación dinámica basado en eventos discretos para gestionar estaciones de carga rápida en tiempo real. El modelo incorpora múltiples servidores (cargadores), una cola compartida y una lógica de asignación flexible para adaptarse a condiciones cambiantes de la demanda. Una de sus principales aportaciones es la capacidad de la estación para ajustar dinámicamente la asignación de cargadores según las tasas de llegada, utilizando políticas de control en tiempo real. El objetivo es maximizar la utilización de los cargadores, minimizar los tiempos de espera y evitar congestiones. El modelo también incorpora parámetros como priorización de vehículos y tipos de carga diferenciados, lo que lo hace aplicable a escenarios reales complejos [21].

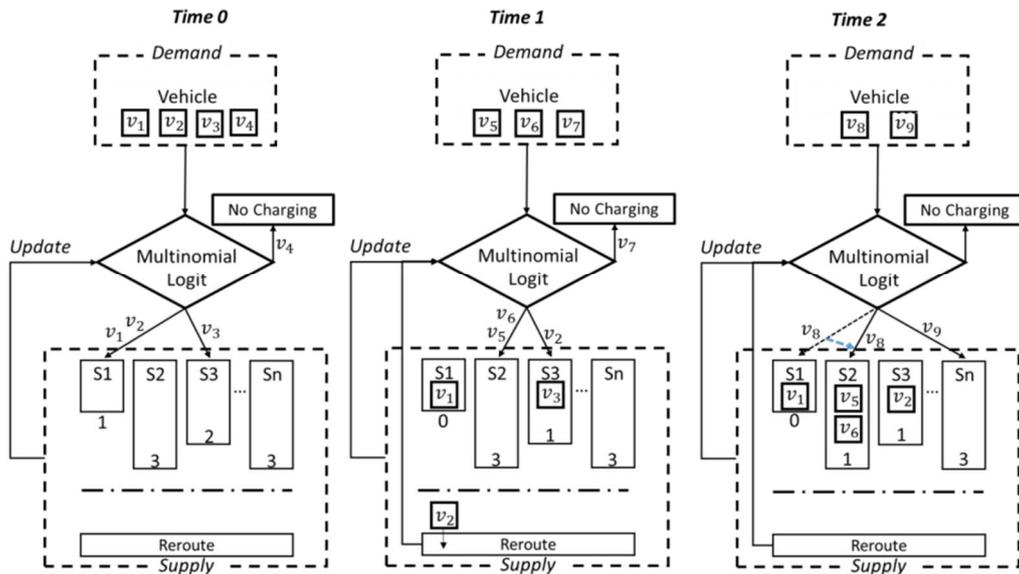


Figura 7. Proceso dinámico de asignación de vehículos eléctricos a estaciones de carga utilizando modelo Multinomial Logit [21]

Chattopadhyay y Kar se centraron en modelar el comportamiento del usuario durante periodos de máxima demanda en estaciones de carga. A diferencia de los modelos tradicionales de colas que asumen usuarios pasivos, este estudio incorpora decisiones como no unirse a la cola, abandonar tras un cierto tiempo de espera, o elegir otra estación cercana. El modelo incluye funciones de utilidad sensibles a la impaciencia, y evalúa cómo estas decisiones afectan a la eficiencia del sistema. Una de sus propuestas clave es la visualización en tiempo real de tiempos de espera estimados para los usuarios, lo que, según sus simulaciones, mejora la satisfacción del usuario y reduce los rechazos. Este tipo de enfoque es especialmente relevante en entornos urbanos con alta densidad de estaciones [22].

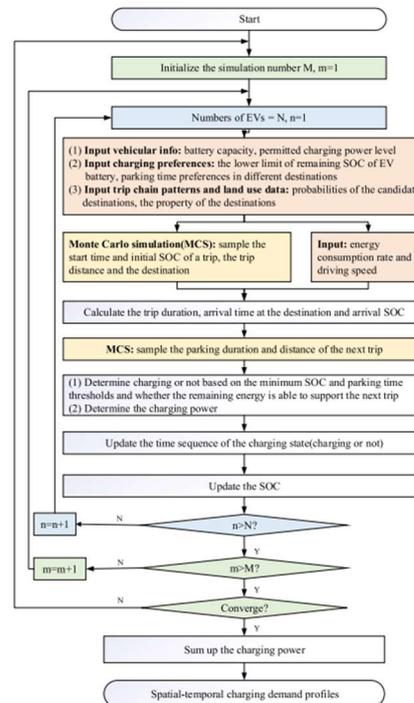


Figura 8. Diagrama de flujo del modelo de simulación Monte Carlo para la estimación de la demanda de recarga de vehículos eléctricos [22]

El estudio actual trata de aportar flexibilidad operativa frente a modelos más rígidos como el M/D/c, destacando especialmente por su capacidad para simular escenarios específicos diarios, semanales y mensuales. Utilizando SimPy se logra además un análisis visual e intuitivo del comportamiento dinámico del sistema, facilitando así la toma de decisiones estratégicas. Asimismo, permite incorporar fácilmente variabilidad temporal y adaptabilidad, características especialmente valiosas en estudios donde la gestión eficiente depende de múltiples variables temporales.

### 3.3 TECNOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE ELECTROLINERAS

#### 3.3.1 Sistemas de Gestión de Carga

Los sistemas de gestión de carga (Charging Management Systems, CMS) desempeñan un papel clave en la administración eficiente de la energía en electrolinerías. Estos sistemas permiten monitorizar y controlar en tiempo real la distribución de la energía, evitando sobrecargas en la red y maximizando la disponibilidad de los puntos de carga [23]. Los CMS

no solo gestionan la carga a nivel de cada punto, sino que también pueden coordinar múltiples cargadores o incluso varias electrolineras dentro de una misma red, asignando de forma inteligente los recursos energéticos según la demanda y la capacidad disponible.

El uso de Energy Management Systems (EMS) permite la supervisión y el ajuste dinámico de la potencia entregada a los VE en función de la capacidad de la red y la demanda en tiempo real [24]. Algunas implementaciones incluyen algoritmos de optimización que asignan prioridades a los vehículos en función de su nivel de batería o el tiempo estimado de espera.

La principal diferencia entre un CMS y un EMS radica en su alcance funcional: mientras que el CMS se enfoca específicamente en la gestión de la carga de los vehículos eléctricos —gestionando los puntos de carga y su asignación—, el EMS abarca una visión más amplia del sistema energético, integrando también fuentes de energía renovable, almacenamiento y consumo general del edificio o infraestructura donde se encuentran las electrolineras.

Además, tecnologías basadas en inteligencia artificial y aprendizaje automático están siendo integradas en los CMS para prever patrones de consumo energético y optimizar la asignación de recursos. Estas soluciones permiten realizar predicciones sobre la demanda de carga y adaptar la distribución de energía en función de factores externos como la hora del día, condiciones climáticas y eventos de alto tráfico vehicular.

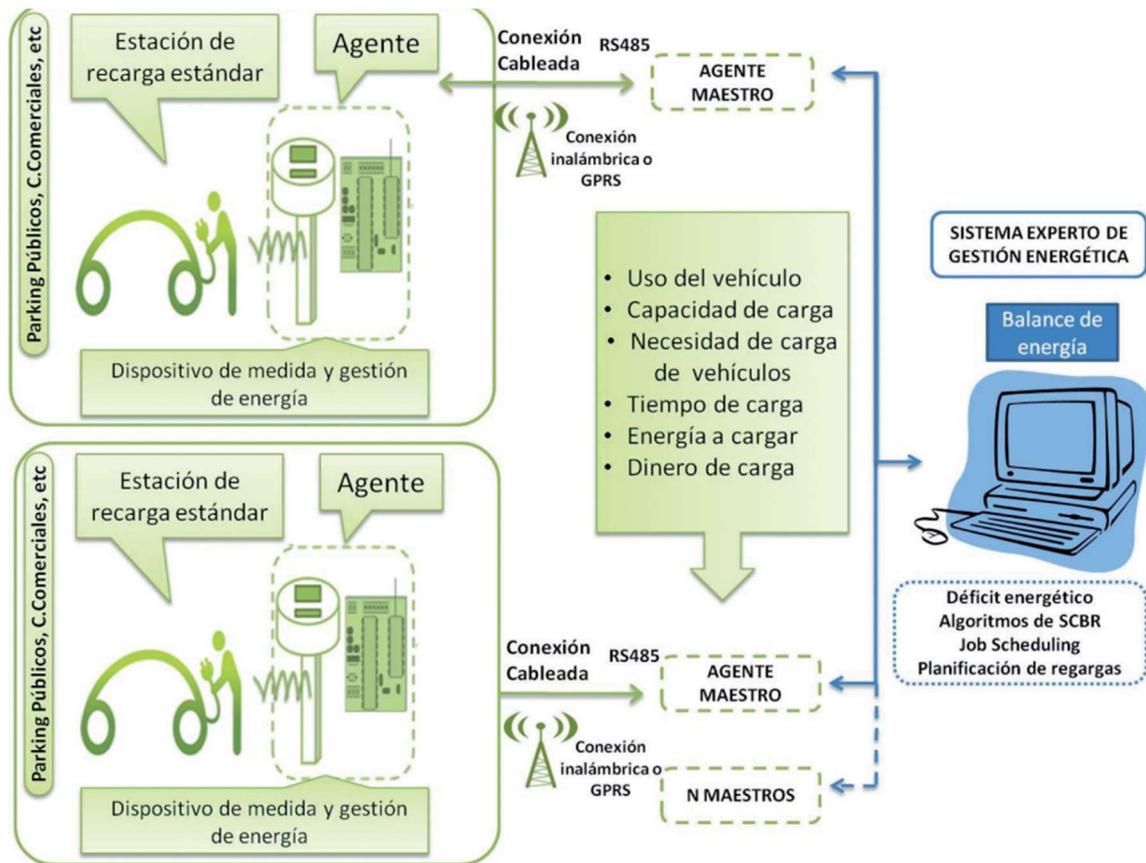


Figura 9. Esquema de la solución propuesta, para la carga de VE en garajes y grandes aparcamientos [24]

En la Figura 9 se presenta un esquema de un Sistema de Gestión de Carga (CMS) basado en una arquitectura distribuida, donde múltiples estaciones de recarga se comunican con un agente maestro encargado de la coordinación energética. Cada estación de carga cuenta con un dispositivo de medición y gestión de energía que recopila información clave sobre el uso del vehículo, la capacidad de carga, la necesidad de energía, el tiempo estimado de carga y el costo asociado.

El agente maestro centraliza la información de múltiples estaciones y la transmite a un sistema experto de gestión energética. Este sistema emplea algoritmos avanzados para el balanceo de carga, la planificación de recargas y la optimización de recursos, mitigando el déficit energético y mejorando la eficiencia operativa de la infraestructura.

Este tipo de CMS permite una gestión inteligente y adaptable de la demanda de carga, evitando la sobrecarga en la red eléctrica y optimizando la distribución de energía en función de las necesidades de los usuarios y la disponibilidad de recursos. Además, facilita la integración con estrategias de job scheduling y planificación dinámica, asegurando un uso eficiente de la infraestructura de carga en estacionamientos públicos y comerciales.

El Internet de las Cosas (IoT) ha transformado la gestión de electrolinerías al permitir una supervisión y control en tiempo real de la infraestructura de carga. Sensores inteligentes y dispositivos conectados permiten recopilar datos sobre el estado de los cargadores en tiempo real, la disponibilidad de estaciones y el consumo energético de cada vehículo.

La combinación de IoT con análisis de big data y computación en la nube ha permitido el desarrollo de plataformas de gestión avanzadas que optimizan el uso de la infraestructura y mejoran la experiencia del usuario. Estas soluciones no sólo facilitan la operación remota de las electrolinerías, sino que también permiten detectar fallos en los sistemas y programar mantenimientos preventivos [25].

Además, la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y notificaciones personalizadas facilita la planificación de la carga, permitiendo a los usuarios conocer la disponibilidad de estaciones en todo momento. La interoperabilidad con diferentes redes de carga y métodos de pago ágiles también contribuye a una experiencia fluida, eliminando fricciones y mejorando la adopción de la movilidad eléctrica.

En última instancia, un sistema de gestión eficiente no solo incrementa la satisfacción del usuario, sino que también fomenta la fidelización y el uso recurrente de la infraestructura, impulsando la sostenibilidad en la movilidad eléctrica [26].

Además, mediante el uso de sensores IoT y la conectividad con la red eléctrica, estos sistemas pueden adaptar dinámicamente la distribución de carga para evitar sobrecargas en la red y mejorar la eficiencia energética del sistema.

Un ejemplo de este tipo de tecnología aplicada a la gestión de colas es el sistema Q-Sige, diseñado para optimizar el flujo de clientes en diversos entornos. Este sistema permite a los usuarios solicitar turnos de manera digital, reducir la incertidumbre respecto a los tiempos de espera y recibir notificaciones cuando su turno está próximo. Aplicado a las electrolinerías, una solución similar podría permitir a los conductores registrarse en una cola virtual, recibir actualizaciones sobre la disponibilidad de los cargadores e incluso asignar turnos de carga en función de la urgencia y el estado de la batería de cada vehículo. Este tipo de herramientas no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también facilita una distribución más equitativa y eficiente de los recursos disponibles, evitando congestiones y maximizando el uso de la infraestructura de recarga [27].

### ***3.3.2 Modelos de Optimización de Colas***

Para garantizar un uso eficiente de la infraestructura de carga, es fundamental implementar modelos de optimización de colas. En este ámbito, la teoría de colas ha sido ampliamente aplicada para modelar el comportamiento de llegada de vehículos y optimizar la asignación de recursos en electrolinerías.

Los modelos clásicos, como M/M/1 y M/M/c, permiten evaluar el rendimiento de las estaciones de carga y calcular métricas clave como el tiempo medio de espera y el nivel de ocupación de los puntos de carga. Además, enfoques basados en sistemas de colas con prioridad han demostrado ser efectivos para reducir los tiempos de espera de los vehículos con baterías en niveles críticos.

Por otro lado, se han desarrollado algoritmos dinámicos de asignación de cargadores que ajustan la oferta en función de la demanda en tiempo real. Estos modelos consideran factores como el estado de carga del vehículo, la disponibilidad de cargadores y la capacidad de la red eléctrica para garantizar una distribución óptima de los recursos.

### ***3.3.3 Sistemas de Reserva y Gestión de Turnos***

Las soluciones de reserva de carga están emergiendo como una herramienta clave en la optimización del uso de electrolineras. Mediante aplicaciones móviles y plataformas web, los usuarios pueden reservar un punto de carga con anticipación, evitando tiempos de espera prolongados y reduciendo la congestión en las estaciones de carga.

La integración de estos sistemas con datos en tiempo real sobre la disponibilidad de cargadores ha demostrado mejorar la eficiencia operativa de las electrolineras. Algunos estudios han señalado que la implementación de sistemas de reserva puede reducir los tiempos de espera hasta en un 40% y optimizar la capacidad instalada de las estaciones de carga.

Una de las soluciones más prometedoras en este ámbito es el desarrollo de aplicaciones móviles y plataformas web que proporcionen información en tiempo real sobre la disponibilidad de puntos de recarga. Estas aplicaciones pueden incluir funcionalidades como reservas anticipadas de cargadores, estimaciones de espera basadas en modelos predictivos y recomendaciones de rutas alternativas en caso de alta demanda en determinadas estaciones.

La plataforma Fleet Reservation de Virta Global permite a los conductores de flotas de VE reservar estaciones de carga con anticipación, reduciendo tiempos de espera y evitando congestiones. Su integración con herramientas de planificación optimiza la distribución de los recursos de carga, mejorando la eficiencia operativa de las electrolineras y la experiencia del usuario [28].

### ***3.3.4 Integración con Energías Renovables y Almacenamiento de Energía***

La sostenibilidad de las electrolineras es un aspecto crucial en el desarrollo de la movilidad eléctrica. Aunque la integración de fuentes de energía renovable, como paneles solares o turbinas eólicas, puede contribuir a reducir parcialmente la dependencia de la red eléctrica convencional, su disponibilidad intermitente obliga a mantener el respaldo de la red para garantizar un suministro continuo.

Además, el almacenamiento de energía mediante baterías estacionarias posibilita una mejor gestión de la demanda, permitiendo acumular energía en períodos de baja utilización y distribuirla en momentos de alta demanda. Tecnologías emergentes como Vehicle-to-Grid (V2G) también están siendo exploradas para permitir que los VE devuelvan energía a la red en momentos críticos, mejorando la estabilidad del suministro energético [30].

### **3.4 DESAFÍOS FUTUROS**

Uno de los principales desafíos en la expansión de la infraestructura de recarga de VE es la limitada disponibilidad de puntos de recarga, especialmente de carga rápida. Actualmente, la oferta de estaciones de recarga no crece al mismo ritmo que la adopción de VE, lo que provoca congestión en las electrolinerías y tiempos de espera prolongados, particularmente en horarios de alta demanda y en rutas de largo recorrido. Esta situación no solo genera inconvenientes para los usuarios, sino que también puede desincentivar la transición hacia la movilidad eléctrica, al percibirse la carga como una barrera frente a la comodidad de repostar combustibles fósiles. Se estima que, para cumplir con los objetivos de descarbonización establecidos en el marco del Pacto Verde Europeo, España debería contar con más de 100,000 puntos de recarga operativos para el año 2030, frente a los aproximadamente 40,000 que existían en 2024 [1]. Sin embargo, el despliegue de nueva infraestructura enfrenta dificultades relacionadas con la inversión requerida, la disponibilidad de espacio urbano y la integración con las redes eléctricas existentes.

Para mitigar estos problemas, es crucial diseñar sistemas avanzados de gestión de carga que permitan distribuir el consumo de manera equilibrada a lo largo del día, evitando picos de demanda que sobrecarguen la red. En este sentido, la integración con fuentes de energía renovable y el almacenamiento en baterías estacionarias pueden jugar un papel fundamental en la estabilidad del sistema eléctrico. También se está investigando el uso de tecnologías de respuesta a la demanda, donde los usuarios reciben incentivos por cargar sus vehículos en momentos en los que la red tiene menor carga [31].

## Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

### JUSTIFICACIÓN

El crecimiento acelerado del parque de vehículos eléctricos (VE) plantea desafíos significativos en la planificación y operación de las estaciones de recarga. La variabilidad en los patrones de demanda, la diversidad de potencias de carga y las limitaciones de infraestructura requieren herramientas que permitan anticipar el comportamiento de las electrolineras antes de su implementación [32].

En un contexto donde las políticas europeas, como el Reglamento (UE) 2023/1804, promueven el despliegue de infraestructuras de combustibles alternativos, herramientas como la desarrollada en este proyecto son fundamentales para una planificación eficiente y alineada con los objetivos de sostenibilidad [33].

### OBJETIVOS

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal el desarrollo de un programa de simulación que permita modelar el comportamiento de una electrolinera bajo diferentes configuraciones de infraestructura y escenarios de demanda. Esta herramienta está concebida como un recurso de apoyo a la toma de decisiones durante las fases de diseño, planificación o mejora de estaciones de carga, especialmente en un contexto de crecimiento progresivo del parque de VE.

A través de este programa, se pretende alcanzar los siguientes fines:

- **Evaluar la adecuación de distintas configuraciones de electrolinera:** el simulador permitirá analizar si una determinada combinación de cargadores —en cuanto a número y potencia— resulta suficiente para dar respuesta a una demanda concreta. De este modo, será posible identificar situaciones de saturación, tiempos de espera elevados o, por el contrario, infrautilización de los recursos disponibles. Esta funcionalidad resulta esencial para dimensionar correctamente la infraestructura desde un enfoque técnico y operativo.

- **Aplicar el modelo tanto a estaciones existentes como a futuras:** el programa ha sido concebido para trabajar con tasas de llegada variables, por lo que puede utilizarse tanto con datos reales actuales —por ejemplo, para evaluar el rendimiento de una electrolinera ya en funcionamiento— como con proyecciones futuras de demanda. Esto permite extender su aplicación a escenarios hipotéticos, como el diseño de una estación que deba estar operativa en el año 2030, ayudando a anticipar necesidades y ajustar el diseño a la evolución prevista del sector.
- **Facilitar la planificación técnica y económica de la infraestructura:** el modelo proporciona resultados cuantitativos sobre el comportamiento de la electrolinera en diferentes condiciones, lo cual permite respaldar con datos decisiones relacionadas con la inversión inicial, el tipo de equipamiento a instalar o la rentabilidad esperada. Así, el simulador actúa como una herramienta objetiva de apoyo en la toma de decisiones estratégicas.
- **Apoyar el desarrollo de políticas y estrategias para una red de recarga más eficiente y sostenible:** más allá de su aplicación técnica, la herramienta también puede emplearse como soporte para la definición de estrategias de despliegue de infraestructura en entornos urbanos, interurbanos o rurales. A través de simulaciones realistas, es posible estudiar cómo se comporta la red ante distintas configuraciones y, en base a ello, tomar decisiones orientadas a mejorar la experiencia del usuario, reducir los tiempos de espera y fomentar una movilidad eléctrica más accesible y robusta.

## **METODOLOGÍA**

El proyecto comenzó con el objetivo inicial de desarrollar un programa de simulación que permitiera modelar el funcionamiento de una electrolinera, tomando como punto de partida el software Arena Simulation Software. Sin embargo, durante las primeras fases del trabajo se identificaron varias limitaciones importantes de esta herramienta. Arena, aunque útil para visualizar procesos y construir modelos de simulación de eventos discretos, presenta limitaciones a la hora de desarrollar modelos fácilmente parametrizables y adaptables a múltiples configuraciones de electrolineras. En particular, su entorno gráfico dificulta la

modificación rápida y sistemática de escenarios desde archivos externos, como sí permite un enfoque programático como el que ofrece SimPy. Cada nuevo componente (vehículo, cargador, recurso...) debía ser introducido de forma manual, lo cual limitaba su escalabilidad y personalización.

Ante estas restricciones, se decidió migrar el desarrollo del simulador a un entorno más flexible y programable: Python. En concreto, se utilizó la librería SimPy, especializada en simulación de eventos discretos, que permite representar sistemas complejos a través de procesos que se ejecutan en paralelo en una línea de tiempo controlada por eventos. El uso de esta librería permite construir un modelo flexible que facilita el análisis rápido de distintas configuraciones de electrolineras, evaluando automáticamente los resultados clave bajo cada escenario.

El programa desarrollado en Python reproduce de forma funcional el comportamiento modelado originalmente en Arena, pero con una estructura mucho más adaptable

Con el objetivo de hacer la herramienta más accesible y usable por cualquier usuario, incluso sin conocimientos de programación, se diseñó una interfaz gráfica a través de Streamlit. Esta interfaz permite al usuario cargar un archivo CSV con los parámetros de entrada, seleccionar los valores deseados para la simulación, y visualizar los resultados de forma clara y estructurada. De este modo, el programa puede ser utilizado por empresas, técnicos o planificadores sin necesidad de manipular directamente el código fuente. El simulador está actualmente disponible como una aplicación web alojada en la nube.

Durante el proceso de desarrollo, se llevó a cabo una verificación cruzada entre el modelo en Python y el modelo original en Arena. Esta comprobación permitió garantizar que los resultados obtenidos en ambos entornos eran coherentes bajo condiciones equivalentes, lo que aporta solidez y fiabilidad al simulador desarrollado.

Uno de los aspectos clave de la metodología ha sido definir cuidadosamente las entradas y salidas del modelo, pensando en el tipo de información que un planificador o gestor de infraestructura podría necesitar a la hora de diseñar una electrolinera. Por ejemplo, se

analizaron estudios y datos reales para determinar que muchos vehículos eléctricos suelen llegar con un 20 % de batería, con una desviación típica asociada [4]. Estos valores fueron utilizados como parámetros por defecto, pero el usuario tiene la posibilidad de modificarlos fácilmente para adaptarlos a su contexto específico. De esta forma, se ha conseguido un modelo con una base sólida, pero al mismo tiempo completamente configurable.

En resumen, el proceso metodológico ha consistido en partir de una herramienta de simulación tradicional (Arena), identificar sus limitaciones, y rediseñar todo el modelo en Python para dotarlo de mayor flexibilidad, capacidad de personalización y accesibilidad, con el objetivo de crear una herramienta realmente útil en contextos reales de diseño y planificación de estaciones de carga.

## PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

### PRESUPUESTO

Costes de Desarrollo	Detalles	Coste estimado (€)
<b>Desarrollo del programa, pruebas y validación y subida a entorno productivo [34]</b>	300 horas de trabajo valoradas a 12 €/h	3.600

*Tabla 1. Costes de desarrollo del programa y puesta en producción*

Costes de puesta en marcha y operativos	Detalles	Coste Anual (€)
<b>Hosting VPS [35]</b>	Servidor privado (20 €/mes)	240

<b>Mantenimiento técnico [36]</b>	3 h/mes a 25 €/h	720
<b>Soporte al cliente [37]</b>	4 h/mes a 12 €/h	576
<b>Marketing y difusión [38]</b>	Estrategia básica (web, LinkedIn...)	200
<b>Dominio y correo profesional [39]</b>	Dominio + correo empresarial	50

*Tabla 2. Costes anuales de operación y mantenimiento del servicio*

### FLUJO DE CAJA PROYECTADO (3 AÑOS)

El modelo de negocio se basa en la comercialización de licencias anuales dirigidas a empresas del sector energético y de movilidad eléctrica. Cada licencia permite el uso ilimitado del simulador, lo que significa que las empresas pueden aplicar la herramienta para diseñar tantas electrolíneas como necesiten, sin restricciones adicionales por proyecto o localización.

El precio de cada licencia anual se ha fijado en 1.500 €, en línea con el valor que aporta la herramienta a la toma de decisiones estratégicas de inversión en infraestructura de recarga.

Se estima que el número de clientes crecerá progresivamente, con un ritmo aproximado del 20% anual. El escenario conservador contempla los siguientes valores:

- En el primer año, se prevé alcanzar 5 empresas usuarias.
- En el segundo año, el número crecería hasta 6 empresas.
- En el tercer año, se llegaría a 7 empresas licenciatarias.

Este crecimiento constante genera una base de ingresos recurrentes y escalables, clave para la sostenibilidad económica del proyecto a medio plazo.

<b>Año</b>	<b>Clientes</b>	<b>Ingresos (€)</b>	<b>Gastos (€)</b>	<b>Flujo Neto (€)</b>
<b>1</b>	5	7.500	5.386	2.114
<b>2</b>	6	9.000	1.786	7.214
<b>3</b>	7	10.500	1.786	8.714

*Tabla 3. Proyección trianual de ingresos, gastos y flujo neto*

### RENTABILIDAD

<b>Indicador</b>	<b>Resultado</b>
------------------	------------------

---

<b>Inversión inicial total (€)</b>	5.386
<b>Beneficio neto a 3 años (€)</b>	18.042
<b>ROI (%)</b>	235%
<b>Payback</b>	2 años

---

*Tabla 4. Indicadores clave de rentabilidad del proyecto*

## CONCLUSIÓN

La estimación económica confirma que el proyecto es viable y rentable. Con una inversión inicial de 5.386 € y un modelo de negocio basado en licencias anuales de 1.500 €, se obtiene un beneficio neto de 18.042 € en tres años, un ROI del 235% y una recuperación de la inversión en solo 2 años. Se trata, por tanto, de una solución sostenible y con alto potencial en un mercado en crecimiento.

## **Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO**

### **ANÁLISIS DEL SISTEMA**

El sistema desarrollado consiste en una herramienta de simulación basada en eventos discretos, cuyo objetivo es modelar el comportamiento dinámico de una electrolinera ante distintas configuraciones de infraestructura y escenarios de demanda. Este sistema ha sido implementado en Python utilizando la librería SimPy, y se ha complementado con una interfaz gráfica en Streamlit, accesible desde cualquier navegador web, que permite a cualquier usuario ejecutar simulaciones sin necesidad de conocimientos en programación.

Desde el punto de vista funcional, el programa simula la llegada de vehículos eléctricos a una electrolinera, su espera en cola para utilizar un cargador, el proceso de carga y el posterior paso por un terminal de pago. A lo largo de la simulación, se registran estadísticas clave como los tiempos de espera en las colas, el tiempo total que cada vehículo permanece en el sistema, la tasa de abandono y la utilización de los cargadores.

### **ENTRADAS DE LA SIMULACIÓN**

El modelo ha sido diseñado con una estructura modular que permite al usuario configurar:

- El número, tipo y potencia de los cargadores disponibles, así como el límite de cola en cada uno de ellos.
- Los tipos de vehículos eléctricos que pueden llegar, definidos según su capacidad de batería y su distribución de estado de carga.
- Los parámetros generales de la simulación: duración total (en minutos) y número de replicaciones.
- Las tasas medias de llegada por día de la semana y por mes, a través de una matriz configurable.
  - Los precios de compra de energía en €/kWh por día de la semana y mes, definidos en una matriz.
  - Los parámetros económicos del sistema: costes fijos y variables, mantenimiento, vida útil de los cargadores y precio de la potencia contratada.

Para introducir esta información, el usuario debe subir seis ficheros CSV que constituyen las entradas del modelo:

- **configuracion\_cargadores.csv**: define la infraestructura de la estación. Incluye una línea para cada tipo de cargador. En cada línea se especifica el tipo de cargador, su potencia en kilovatios (kW), el número de unidades disponibles, el límite de cola (número máximo de VE que pueden estar en la cola de espera de cada cargador) y el precio de venta de la energía en €/kWh.

tipo_cargador	potencia_kW	cantidad	limite_cola	precio_venta_euros/kWh
100kW	100	1	1	0,35
350kW	350	1	1	0,40

*Tabla 5. Parámetros técnicos y económicos de los tipos de cargadores seleccionados.*

- **tipos\_VE.csv**: establece los perfiles de VE que llegan a la estación. Cada tipo de VE se define por su probabilidad de aparición, su capacidad de batería (indicada en la etiqueta del tipo, en kWh) y la fracción media y desviación típica de batería que necesita cargar (no con la que llegan). Esto permite simular la cantidad de energía que un vehículo necesita cargar de forma realista y variable.

tipo_VE	probabilidad	bateria_media	bateria_desviacion
120kWh	0,2	0,8	0,2
70kWh	0,3	0,8	0,2
40kWh	0,5	0,8	0,2

*Tabla 6. Distribución de llegada de vehículos y demanda media de recarga.*

- **parametros\_simulacion.csv**: recoge dos parámetros globales: la duración total de la simulación, expresada en minutos, y el número de replicaciones que se desean ejecutar. Al repetir varias veces el mismo escenario con diferentes semillas aleatorias, se obtiene una media estadísticamente más fiable de los resultados.

tiempo_simulacion_min	numero_replicaciones	fecha_inicio_simulacion
525,600	1	01-01-2030

*Tabla 7. Parámetros globales de la simulación.*

- **tiempo\_entre\_llegadas.csv**: representa los tiempos medios de llegada en minutos entre dos vehículos consecutivos, diferenciando por día de la semana y por mes del año. Esta matriz permite incorporar estacionalidad y variación diaria en la demanda, algo especialmente útil para evaluar escenarios realistas como fines de semana, meses turísticos o jornadas laborables. Los tiempos se expresan en minutos.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
<b>Lunes</b>	38,913	38,898	38,564	40,578	30,285	47,085	54,755	38,913
<b>Martes</b>	33,602	37,442	36,463	32,147	24,435	41,074	49,792	33,602
<b>Miércoles</b>	41,406	39,358	39,287	36,100	26,970	43,253	51,592	41,406
<b>Jueves</b>	33,022	32,504	27,744	26,529	25,821	40,304	40,858	33,022
<b>Viernes</b>	38,020	35,325	35,101	31,208	22,486	36,267	45,900	38,020
<b>Sábado</b>	33,614	34,916	33,298	29,673	21,886	34,517	43,055	33,614
<b>Domingo</b>	31,347	31,685	31,422	26,534	20,604	26,367	36,251	31,347

*Tabla 8. Tiempos medios de llegada entre dos vehículos consecutivos por día de la semana y mes del año (en minutos)*

- **parametros\_economicos.csv**: contiene los valores clave para el análisis económico de la electrolinera (en el apartado de implementación se puede encontrar una descripción detallada de cada variable), incluyendo los costes fijos y variables de operación (euros), el precio de la electricidad (€/kWh), la vida útil esperada de los equipos (años), la tasa de descuento y otros factores que permiten calcular indicadores como el ROI.

Variable	valor
<b>coste_mantenimiento_pct</b>	0,07
<b>vida_util_cargador_anos</b>	15
<b>coste_explotacion_anual_euros</b>	50.000
<b>inversion_fija_por_cargador_euros</b>	20.000
<b>inversion_variable_cargador_euros/kW</b>	300
<b>precio_potencia_anual_euros/kW</b>	50

*Tabla 9. Parámetros económicos de la simulación*

- **precio\_compra\_por\_dia\_y\_mes.csv**: indica el precio en euros/kW de la electricidad para cada combinación de día de la semana y mes del año. Este fichero permite reflejar fluctuaciones tarifarias en la simulación.

	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>
<b>Lunes</b>	0,142	0,159	0,183	0,208	0,219	0,179	0,168	0,144
<b>Martes</b>	0,141	0,15	0,171	0,197	0,215	0,182	0,155	0,133
<b>Miércoles</b>	0,137	0,161	0,174	0,202	0,217	0,179	0,157	0,149
<b>Jueves</b>	0,141	0,15	0,173	0,201	0,224	0,181	0,159	0,138
<b>Viernes</b>	0,142	0,151	0,182	0,198	0,217	0,183	0,165	0,145
<b>Sábado</b>	0,128	0,139	0,144	0,164	0,194	0,177	0,15	0,135
<b>Domingo</b>	0,12	0,138	0,127	0,164	0,18	0,159	0,14	0,11

*Tabla 10. Precio de compra de electricidad según día de la semana y mes del año*

A partir de estas entradas, el sistema construye la electrolinera simulada, inicializando los recursos (cargadores), los tipos de vehículos eléctricos, los parámetros económicos y las tasas de llegada de VE por día y mes. Cada vehículo es tratado como un proceso independiente que, al llegar, selecciona un cargador adecuado en función de su capacidad de batería y de la disponibilidad en las colas. En concreto, se impone la restricción de que los VE con capacidad inferior a 70 kWh no pueden utilizar cargadores con potencias superiores a 100 kW. Si todos los cargadores compatibles tienen sus colas completas (según el límite definido), el vehículo abandona la estación y se contabiliza bajo la métrica "VE que abandonan sin servicio". Si accede a un cargador, el vehículo inicia el proceso de carga, cuya duración se simula mediante una distribución normal.

La energía a cargar se estima como:

$$E_{necesaria} = C_{vehículo} \times f$$

*Ecuación 7. Energía necesaria para cargar un vehículo*

Donde  $C_{vehículo}$  es la capacidad total de la batería (en kWh) y  $f$  es un valor aleatorio extraído de una distribución normal con media y desviación típica propias de ese tipo de vehículo (por ejemplo, media = 0.8,  $\sigma$  = 0.2). Este valor representa el porcentaje de batería a recargar.

A partir de esa energía, la media del tiempo de carga en minutos se calcula como:

$$\mu = \frac{C_{vehículo} \times f}{P_{cargador}} \times 60$$

Ecuación 8. Tiempo que tarda de media en cargarse cada vehículo

y la desviación típica como:

$$\sigma = \frac{C_{vehículo} \times \sigma_f}{P_{cargador}} \times 60$$

Ecuación 9. Desviación típica del tiempo de carga

donde  $\sigma_f$  es la desviación típica del porcentaje de batería con el que llegan los vehículos.

Esto permite generar tiempos de carga realistas que varían en función del tipo de coche, del estado de carga inicial y de la potencia del cargador. Una vez completado el proceso de carga, el vehículo abandona el sistema.

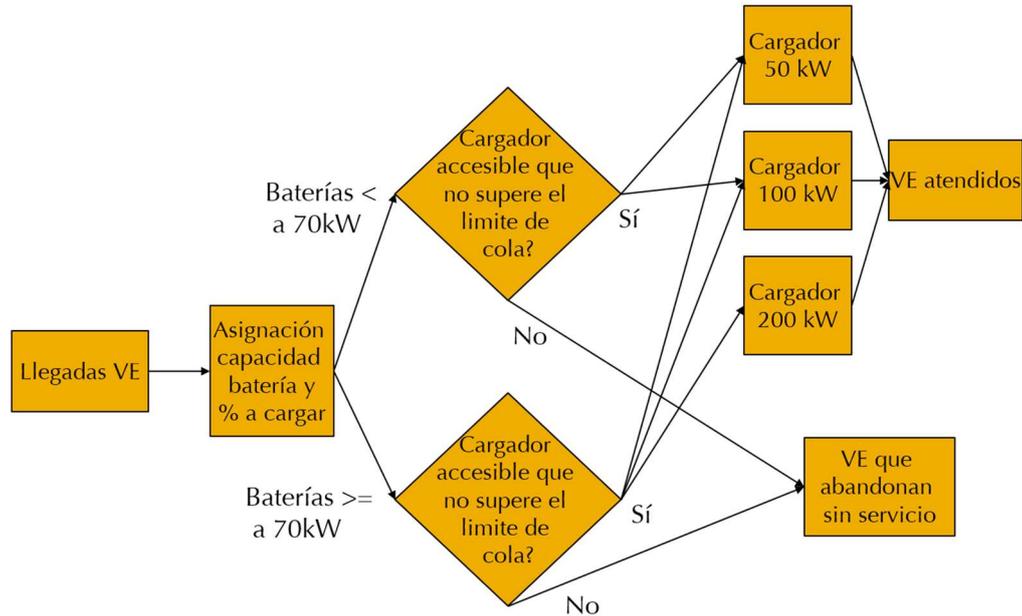


Figura 10. Diagrama de flujo para la gestión de la llegada de VE

## RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Durante la simulación se recopilan automáticamente una serie de métricas que permiten evaluar tanto el rendimiento operativo como la viabilidad económica de la electrolinera. Estas métricas incluyen, entre otras, el número de vehículos atendidos y los que no reciben servicio, los tiempos de permanencia en el sistema, los tiempos de espera en cola, la ocupación de los cargadores, la energía suministrada y los resultados económicos globales. También se desglosan los resultados por tipo de vehículo, lo que permite analizar el comportamiento del sistema frente a distintos perfiles de demanda.

Estos son los resultados obtenidos en una simulación de ejemplo con un cargador de 50 kW y uno de 200 kW:

Concepto	Valor
<b>VE atendidos</b>	11.539
<b>VE que abandonan sin servicio</b>	4.268
<b>Tasa de abandono (%)</b>	27

*Tabla 11. Resultados globales de atención y abandono de vehículos eléctricos*

Estas variables representan el resultado del proceso de asignación de cargadores: los ‘VE atendidos’ son los que han conseguido acceder a un cargador y completar la carga, mientras que los ‘VE que abandonan sin servicio’ son aquellos que, al llegar, encuentran todas las colas de los cargadores llenas y no pueden incorporarse al sistema. La ‘tasa de abandono’ expresa esta situación como porcentaje del total de llegadas.

Concepto	Valor
<b>Tiempo promedio en el sistema (min)</b>	52,45
<b>Tiempo máximo en el sistema (min)</b>	379,93

*Tabla 12. Tiempos globales en el sistema de recarga*

Estas métricas representan el tiempo total que cada vehículo pasa en la electrolinera desde que llega hasta que se va, ya sea tras cargar o por abandonar: el ‘tiempo promedio en el sistema’ refleja la media de todos los VE que han pasado por la electrolinera, incluyendo tanto los atendidos como los que abandonan, mientras que el ‘tiempo máximo en el sistema’

señala el mayor tiempo registrado por un solo vehículo. Este tiempo en el sistema incluye el tiempo de carga y, en caso de haber sido necesario, el tiempo de espera.

Concepto	Valor
<b>Tiempo promedio en cola de cargadores (min)</b>	24,57
<b>Tiempo máximo en cola de cargadores (min)</b>	207,69
<b>Longitud promedio de la cola</b>	0,56
<b>% VE que esperan</b>	57,21

*Tabla 13. Métricas de espera y longitud de cola*

Estas variables describen el comportamiento de las colas en los cargadores. El ‘tiempo promedio en cola de cargadores’ indica cuánto tiempo han esperado, de media, los vehículos que tuvieron que hacer cola antes de cargar, mientras que el ‘tiempo máximo en cola de cargadores’ refleja la mayor espera registrada. El ‘% de VE que esperan’ muestra qué proporción de los VE atendidos no accedieron directamente a un cargador al llegar, debiendo esperar en cola.

Concepto	Valor
<b>120kWh</b>	3.206
<b>70kWh</b>	4.733
<b>40kWh</b>	7.871
<b>VE atendidos tipo 120kWh</b>	3.132
<b>VE atendidos tipo 70kWh</b>	4.622
<b>VE atendidos tipo 40kWh</b>	3.785
<b>VE que abandonan tipo 120kWh</b>	72
<b>VE que abandonan tipo 70kWh</b>	111
<b>VE que abandonan tipo 40kWh</b>	4.085

*Tabla 14. Análisis de servicio prestado por tipo de coche eléctrico*

Estas variables desglosan el comportamiento de la demanda según el tipo de batería de los vehículos. Las tres primeras (‘120kWh’, ‘70kWh’ y ‘40kWh’) indican el número total de VE de cada tipo que han llegado a la electrolinera. Las siguientes muestran cuántos de ellos han sido atendidos (‘VE atendidos tipo...’) y cuántos han abandonado sin recibir servicio (‘VE que abandonan tipo...’), permitiendo analizar el rendimiento del sistema según la capacidad de batería del vehículo.

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
<b>Tiempo medio de carga (min)</b>	47,29
<b>Ocupación media cargadores (%)</b>	51,91
<b>VE atendidos/día</b>	31,61

*Tabla 15. Indicadores operativos de carga y utilización de la infraestructura*

Estas métricas resumen la utilización de los cargadores. El ‘tiempo medio de carga’ indica cuánto tarda, de media, un vehículo en completar su carga una vez conectado. La ‘ocupación media de los cargadores’ refleja el porcentaje de tiempo durante el cual los cargadores estuvieron en uso a lo largo de la simulación, lo que permite evaluar el nivel de saturación del sistema. Finalmente, los ‘VE atendidos/día’ representan la media diaria de vehículos que han conseguido cargar en la electrolinera.

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
<b>Energía/cargador/hora de media (kWh)</b>	38,11
<b>Energía total 50kW (MWh)</b>	380,084
<b>Energía total 200kW (MWh)</b>	287,679
<b>Energía total coche 120kWh (MWh)</b>	859,704
<b>Energía total coche 70kWh (MWh)</b>	254,113
<b>Energía total coche 40kWh (MWh)</b>	118,857
<b>Energía total Lunes (MWh)</b>	80,459
<b>Energía total Martes (MWh)</b>	87,942
<b>Energía total Miércoles (MWh)</b>	91,247
<b>Energía total Jueves (MWh)</b>	91,926
<b>Energía total Viernes (MWh)</b>	104,205
<b>Energía total Sábado (MWh)</b>	118,372
<b>Energía total Domingo (MWh)</b>	93,609
<b>Energía total Enero (MWh)</b>	48,011
<b>Energía total Febrero (MWh)</b>	49,566
<b>Energía total Marzo (MWh)</b>	51,239
<b>Energía total Abril (MWh)</b>	56,991
<b>Energía total Mayo (MWh)</b>	56,888
<b>Energía total Junio (MWh)</b>	58,273
<b>Energía total Julio (MWh)</b>	63,125
<b>Energía total Agosto (MWh)</b>	62,371
<b>Energía total Septiembre (MWh)</b>	54,920
<b>Energía total Octubre (MWh)</b>	57,828
<b>Energía total Noviembre (MWh)</b>	52,320

<b>Energía total Diciembre (MWh)</b>	<b>56,225</b>
--------------------------------------	---------------

*Tabla 16. Energía total suministrada desglosada por tipo de cargador, tipo de vehículo, día de la semana y mes del año*

Estas variables permiten analizar la energía suministrada por la electrolinera desde distintas perspectivas. La ‘energía/cargador/hora de media’ indica cuántos kilovatios-hora (kWh) entrega, en promedio, cada cargador por hora activa, lo que ayuda a evaluar su eficiencia operativa. Las variables ‘energía total 50kW’ y ‘200kW’ representan la energía total suministrada por cada tipo de cargador según su potencia, mientras que las variables ‘energía total coche 120kWh’, ‘70kWh’ y ‘40kWh’ reflejan el consumo agregado por tipo de vehículo según su capacidad de batería. Finalmente, las variables desglosadas por días de la semana y por meses del año muestran la energía total suministrada en cada periodo, permitiendo identificar patrones diarios y estacionales en la demanda energética.

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
<b>50kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	207,69
<b>50kW - Tiempo medio de carga (min)</b>	61,48
<b>50kW - Ocupación media (%)</b>	87,39
<b>50kW - VE atendidos/día</b>	20,47
<b>200kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	48,30
<b>200kW - Tiempo medio de carga (min)</b>	21,22
<b>200kW - Ocupación media (%)</b>	16,42
<b>200kW - VE atendidos/día</b>	11,15

*Tabla 17. Comportamiento operativo por tipo de cargador*

Estas variables permiten evaluar el rendimiento individual de cada tipo de cargador según su potencia (50 kW y 200 kW). El ‘tiempo máximo en cola’ indica la mayor espera registrada por un vehículo para acceder a ese tipo de cargador. El ‘tiempo medio de carga’ refleja cuánto tarda, de media, un coche en completar la carga en ese tipo de equipo (sin incluir el tiempo, que, en caso de haber sido necesario, haya esperado el vehículo para cargar). La ‘ocupación media’ expresa el porcentaje de tiempo que los cargadores de esa potencia estuvieron en uso, lo que da una medida de su grado de utilización. Por último, los ‘VE atendidos/día’ indican cuántos vehículos, en promedio diario, completaron su carga en cada tipo de cargador.

Concepto	Valor
<b>Ingresos anuales (€)</b>	238.599,19
<b>Costes anuales (€)</b>	191.850,80
<b>Beneficio neto anual (€)</b>	46.748,39
<b>Rentabilidad sobre inversión (%)</b>	40,65

Tabla 18. Resultados económicos anuales y rentabilidad del sistema

Esta tabla presenta los principales indicadores económicos resultantes de la simulación. Incluye el cálculo de los ingresos, los costes, el beneficio neto y la rentabilidad sobre la inversión (ROI).

*Ingresos anuales*

$$= \Sigma \left[ \text{Energía suministrada por tipo de cargador (kWh)} \right. \\ \left. \times \text{Precio de venta por tipo} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \right]$$

Ecuación 10. Cálculo de los ingresos anuales en función de la energía suministrada y el precio de venta por tipo de cargador

Los costes anuales incluyen:

- El coste de la energía comprada a red (variable en función del día y mes Tabla 10).
- Costes de mantenimiento (calculados como un porcentaje anual del coste de inversión inicial, representan los gastos necesarios para conservar en buen estado los equipos e instalaciones a lo largo del tiempo).
- Costes de amortización del CAPEX, distribuidos a lo largo de la vida útil estimada.
- Costes de explotación anual (gastos recurrentes del funcionamiento diario de la electrolinera).
- Coste anual por la potencia contratada (potencia total instalada multiplicada por el precio anual por kW).

$$\text{CAPEX (por cargador)} = \text{coste\_fijo} + (\text{potencia\_kW} \times \text{coste\_variable})$$

Ecuación 11. Cálculo del coste de inversión (CAPEX) por cargador en función de su potencia

$$\text{Costes anuales} = \text{Coste energía} + \text{Coste mantenimiento} + \text{Amortización CAPEX} + \\ \text{Costes de explotación} + \text{Costes potencia contratada}$$

Ecuación 12. Composición de los costes anuales de operación de la electrolinera

Fórmula de amortización del CAPEX:

$$\text{Amortización anual} = \frac{\text{CAPEX total}}{\text{Vida útil (años)}}$$

*Ecuación 13. Cálculo de la amortización anual del CAPEX*

El beneficio neto anual se obtiene restando los costes anuales a los ingresos anuales.

$$\text{Beneficio neto anual} = \text{Ingresos anuales} - \text{Costes anuales}$$

*Ecuación 14. Cálculo del beneficio neto anual*

La rentabilidad sobre inversión (ROI) indica el rendimiento económico del proyecto respecto a la inversión inicial (CAPEX). Se expresa como un porcentaje del beneficio neto anual sobre el capital invertido.

$$\text{ROI (\%)} = \left( \frac{\text{Beneficio neto anual}}{\text{CAPEX total}} \right) \times 100$$

*Ecuación 15. Cálculo de la rentabilidad sobre la inversión (ROI)*

La interfaz desarrollada en Streamlit permite subir los archivos directamente desde el navegador, visualizar los datos de entrada, lanzar la simulación y consultar los resultados en formato tabular. Estos resultados también pueden descargarse como archivo CSV, lo que facilita su análisis posterior en Excel o herramientas estadísticas. La aplicación está alojada públicamente en la siguiente dirección:

[HTTPS://SIMULADOR-ELECTROLINERA-FSE3FELJFWITU6KERIUAV.STREAMLIT.APP/](https://simulador-electrolinera-fse3feljfwitu6keriuav.streamlit.app/).

Este enfoque basado en una interfaz sencilla, una lógica de simulación robusta y entradas completamente configurables convierte al sistema en una herramienta versátil. Puede utilizarse tanto para evaluar el rendimiento de estaciones existentes como para diseñar nuevas electrolineras optimizadas, adaptadas a las necesidades reales de cada ubicación y contexto.

## Capítulo 6. IMPLEMENTACIÓN

Como parte de la validación y aplicación práctica del simulador desarrollado, se ha llevado a cabo un caso de estudio centrado en una ubicación concreta: un tramo de vía de alta capacidad próximo a Aranjuez.

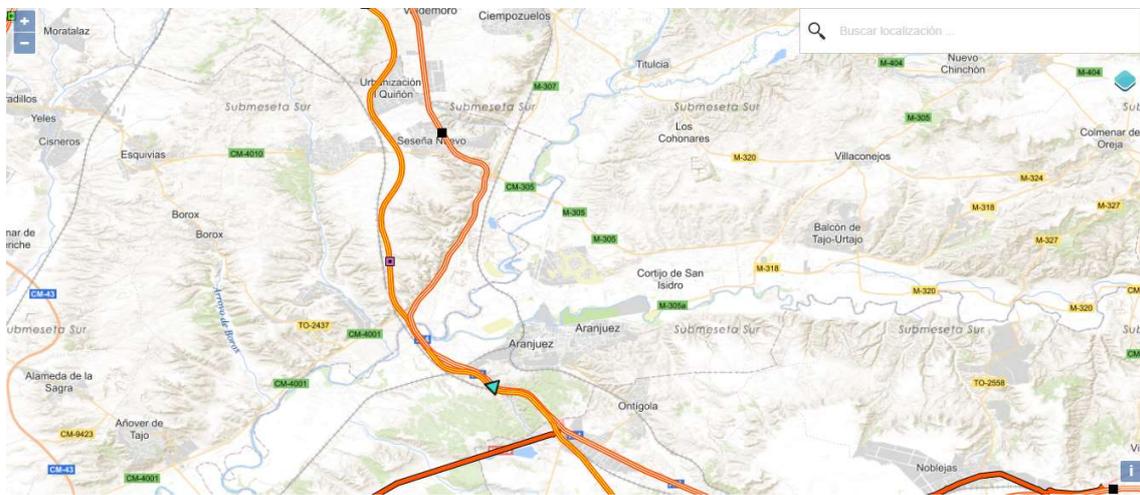


Figura 11. Ubicación seleccionada para el caso de estudio: tramo de la A-4 próximo a Aranjuez [40]

Esta localización fue seleccionada por su posición estratégica dentro de la red viaria española y su elevado volumen de tráfico, según datos oficiales del Ministerio de Transportes. A partir del Índice Medio Diario (IMD) de vehículos registrado en 2022, y aplicando una tasa de crecimiento anual estimada del 1 %, se ha proyectado el flujo de vehículos para el año 2030.

MINISTERIO DE FOMENTO		SECRETARÍA DE ESTADO DE PLANIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURAS			SECRETARÍA GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS		DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS	
<b>ESTACIONES. DATOS DEFINITIVOS TRAFICO</b>				<b>AÑO:</b> 2022				
<b>Estacion:</b>	M-975-0	<b>Via:</b>	A-4	<b>PK:</b>	49,14	<b>tipo:</b>	Autovia	
<b>Provincia:</b>	MADRID							
Calzada 1	IMD Definitivo	Num Días	Nº Días Validos	Nº Días Validos 84	Afin			
Motos:	0	364	84	84				
Ligeros:	16.521	364	84	84	M-975-0			
Pesados:	5.007	364	84	84	M-975-0			
<b>Total:</b>	<b>21.528</b>	<b>364</b>	<b>84</b>	<b>84</b>				

Total	Mes	L	M	X	J	V	S	D	T
	ENERO	18563	18570	18731	17801	23851	15341	13192	17714
	FEBRERO	21497	19292	19810	22470	29562	17586	14507	20675
	MARZO	17445	18353	18386	20009	26783	16700	14001	18821
	ABRIL	21874	22223	26036	27236	26297	18782	17699	22566
	MAYO	18999	20483	20579	23146	32124	19917	15737	21263
	JUNIO	21489	20688	21693	24343	33004	20927	16777	22724
	JULIO	23043	22797	22988	27223	35058	27395	19926	25681
	AGOSTO	26411	23262	22908	24805	32556	23513	18282	24239
	SEPTIEMBRE	20903	20146	20390	22892	30800	19340	16108	21867
	OCTUBRE	20099	20254	20514	22166	31114	21212	16539	21338
	NOVIEMBRE	19440	19527	19552	20745	27603	17521	15695	19853
	DICIEMBRE	20108	20453	21427	22249	28385	21693	15753	21545
	TOTAL	20705	20482	21060	22881	29790	20169	16222	21528

\* => Dato Estimado; Dato original eliminado      \*\* => Dato Estimado;      \*\*\* => Dato Estimado en Pesados;      \*\*\*\* => Dato Estimado en una calzada;

Figura 12. Intensidad Media Diaria (IMD) en 2022 en el emplazamiento del caso de estudio, desglosada por día de la semana y mes

## CÁLCULO DE DATOS DE ENTRADA

Para estimar la demanda específica de vehículos eléctricos en esa ubicación, se han considerado los objetivos del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), que prevé que en 2030 haya en circulación alrededor de 5,5 millones de vehículos eléctricos en España. Tomando como base un parque automovilístico total estimado de 33 millones de vehículos, se deduce que un 16–17 % del tráfico estará compuesto por vehículos eléctricos. Sin embargo, dicho valor incluye también a los vehículos híbridos y camiones que no se consideran en este análisis, debido a que los híbridos tienden a cargar únicamente en origen y destino y que los camiones emplean cargadores de potencias más altas [4]. Los coches ligeros puramente eléctricos forman aproximadamente el 70%. De estos, se ha considerado que un 15 % podrían detenerse a recargar en una electrolinera pública, mientras que el 85 % restante recarga habitualmente en origen o en destino, según hipótesis basadas en estudios de hábitos de carga [41].

Adicionalmente, se ha estimado la probabilidad de que un vehículo eléctrico necesite recargar en función de su autonomía y la distancia media entre electrolineras establecida por la normativa europea (30 km). A partir de una flota compuesta por vehículos con baterías de 40, 70 y 120 kWh, y asumiendo una eficiencia media de 5,26 km/kWh, se ha calculado una probabilidad ponderada de parada para recarga del 10,54 %. Combinando estos factores, se

ha obtenido una estimación de vehículos eléctricos que se detendrían en la electrolinería cada día del año. Para llegar a este valor se realizan las operaciones indicadas a continuación.

$$\text{Probabilidad de carga} = \frac{\text{Distancia entre electrolinerías}}{\text{Autonomía total}}$$

*Ecuación 16. Probabilidad de carga en función de la distancia entre electrolinerías y la autonomía del vehículo*

Se consideran tres tipos de vehículos con diferentes capacidades de batería. Para vehículos con 120 kWh (20 %), la autonomía es:  $120 \times 5,26 = 631,2$  km y la probabilidad de carga:  $30 / 631,2 \approx 0,048$  (4,8 %). Para vehículos con 70 kWh (30 %), la autonomía es:  $70 \times 5,26 = 368,2$  km y la probabilidad de carga:  $30 / 368,2 \approx 0,081$  (8,1 %). Para vehículos con 40 kWh (50 %), la autonomía es:  $40 \times 5,26 = 210,4$  km y la probabilidad de carga:  $30 / 210,4 \approx 0,143$  (14,3 %).

La probabilidad media se obtiene ponderando las probabilidades individuales según la proporción de cada tipo de vehículo en la flota:

$$\text{Probabilidad media} = (0,048 \times 0,2) + (0,081 \times 0,3) + (0,143 \times 0,5) = 0,1052$$

*Ecuación 17. Cálculo de la probabilidad media de carga ponderada según la distribución del parque de vehículos eléctricos*

Con esta estimación diaria y su desglose por día de la semana y mes, se ha calculado el tiempo medio entre llegadas de vehículos eléctricos a la estación (en minutos), configurando así la matriz de entradas para el fichero **tiempo\_entre\_llegadas.csv** del simulador. Esta matriz reproduce de forma realista los patrones de llegada durante todo el año 2030, permitiendo ejecutar la simulación bajo condiciones adaptadas al entorno real previsto.

Este caso de estudio ha servido como ejemplo práctico para validar el modelo desarrollado, permitiendo experimentar con diferentes configuraciones de infraestructura, niveles de demanda y parámetros operativos. Los resultados obtenidos proporcionan información clave para tomar decisiones sobre el número y tipo de cargadores, la necesidad de reforzar los

puntos de recarga en función de la estacionalidad, y la evaluación de la rentabilidad de la inversión en función de la afluencia esperada.

Cálculos de la estimación de la llegada a la electrolinera estudiada:

Partimos del IMD (**número medio de vehículos** que circulan por un punto de una vía durante un día.) de coches en 2022:

	L	M	X	J	V	S	D
<b>ENERO</b>	18.563	18.570	18.731	17.801	23.851	15.341	13.192
<b>FEBRERO</b>	21.497	19.292	19.810	22.470	29.562	17.586	14.507
<b>MARZO</b>	17.445	18.353	18.386	20.009	26.783	16.700	14.001
<b>ABRIL</b>	21.874	22.223	26.036	27.228	27.975	17.922	17.679
<b>MAYO</b>	18.999	20.448	20.579	23.146	32.124	19.917	15.737
<b>JUNIO</b>	21.489	20.688	21.693	24.343	33.004	20.927	16.777
<b>JULIO</b>	23.043	22.797	22.988	27.223	35.058	27.395	19.926
<b>AGOSTO</b>	26.411	23.262	22.908	24.805	32.556	23.513	18.282
<b>SEPTIEMBRE</b>	19.740	20.146	20.390	22.892	30.800	19.340	16.108
<b>OCTUBRE</b>	20.099	20.254	20.514	22.166	31.114	21.212	21.338
<b>NOVIEMBRE</b>	19.440	19.527	19.552	20.745	27.603	17.521	15.695
<b>DICIEMBRE</b>	20.108	20.453	21.427	22.249	29.785	19.753	17.523

Tabla 19. Intensidad Media Diaria (IMD) de vehículos por día de la semana y mes del año en 2022

IMD de coches estimado en 2030 asumiendo un crecimiento anual del 1% en el número de vehículos:

	L	M	X	J	V	S	D
<b>ENERO</b>	20.101	20.109	20.283	19.276	25.827	16.612	14.285
<b>FEBRERO</b>	23.278	20.890	21.451	24.332	32.011	19.043	15.709
<b>MARZO</b>	18.890	19.874	19.909	21.667	29.002	18.084	15.161
<b>ABRIL</b>	23.686	24.064	28.193	29.484	30.293	19.407	19.144
<b>MAYO</b>	20.573	22.142	22.284	25.064	34.786	21.567	17.041
<b>JUNIO</b>	23.270	22.402	23.490	26.360	35.739	22.661	18.167
<b>JULIO</b>	24.952	24.686	24.893	29.479	37.963	29.665	21.577
<b>AGOSTO</b>	28.599	25.189	24.806	26.860	35.253	25.461	19.797
<b>SEPTIEMBRE</b>	21.376	21.815	22.079	24.789	33.352	20.942	17.443
<b>OCTUBRE</b>	21.764	21.932	22.214	24.003	33.692	22.970	23.106
<b>NOVIEMBRE</b>	21.051	21.145	21.172	22.464	29.890	18.973	16.995
<b>DICIEMBRE</b>	21.774	22.148	23.202	24.092	32.253	21.390	18.975

Tabla 20. Estimación de la Intensidad Media Diaria (IMD) de vehículos por día de la semana y mes del año en 2030

IMD de coches eléctricos estimado en 2030 (5,5 millones de los 33 millones), lo que representa aproximadamente el 16,6% del total de vehículos, asumiendo que el 70% de los vehículos electrificados serán eléctricos puros (excluyendo híbridos):

	L	M	X	J	V	S	D
<b>ENERO</b>	2.345	2.346	2.366	2.249	3.013	1.938	1.667
<b>FEBRERO</b>	2.716	2.437	2.503	2.839	3.735	2.222	1.833
<b>MARZO</b>	2.204	2.319	2.323	2.528	3.384	2.110	1.769
<b>ABRIL</b>	2.763	2.808	3.289	3.440	3.534	2.264	2.233
<b>MAYO</b>	2.400	2.583	2.600	2.924	4.058	2.516	1.988
<b>JUNIO</b>	2.715	2.614	2.741	3.075	4.170	2.644	2.119
<b>JULIO</b>	2.911	2.880	2.904	3.439	4.429	3.461	2.517
<b>AGOSTO</b>	3.337	2.939	2.894	3.134	4.113	2.970	2.310
<b>SEPTIEMBRE</b>	2.494	2.545	2.576	2.892	3.891	2.443	2.035
<b>OCTUBRE</b>	2.539	2.559	2.592	2.800	3.931	2.680	2.696
<b>NOVIEMBRE</b>	2.456	2.467	2.470	2.621	3.487	2.213	1.983
<b>DICIEMBRE</b>	2.540	2.584	2.707	2.811	3.763	2.495	2.214

Tabla 21. Estimación de la IMD de vehículos eléctricos por día de la semana y mes del año en 2030

IMD de VE con necesidad de carga en cargadores públicos en 2030, estimado considerando que el 15% de los vehículos recargan habitualmente en puntos públicos y que solo el 10,52% de ellos requerirán carga debido a su autonomía limitada:

	L	M	X	J	V	S	D
<b>ENERO</b>	37,01	37,02	37,34	35,49	47,55	30,58	26,30
<b>FEBRERO</b>	42,86	38,46	39,49	44,79	58,93	35,06	28,92
<b>MARZO</b>	34,78	36,59	36,65	39,89	53,39	33,29	27,91
<b>ABRIL</b>	43,61	44,30	51,90	54,28	55,77	35,73	35,24
<b>MAYO</b>	37,88	40,76	41,03	46,14	64,04	39,71	31,37
<b>JUNIO</b>	42,84	41,24	43,25	48,53	65,79	41,72	33,45
<b>JULIO</b>	45,94	45,45	45,83	54,27	69,89	54,61	39,72
<b>AGOSTO</b>	52,65	46,37	45,67	49,45	64,90	46,87	36,45
<b>SEPTIEMBRE</b>	39,35	40,16	40,65	45,64	61,40	38,56	32,11
<b>OCTUBRE</b>	40,07	40,38	40,90	44,19	62,03	42,29	42,54
<b>NOVIEMBRE</b>	38,75	38,93	38,98	41,36	55,03	34,93	31,29
<b>DICIEMBRE</b>	40,09	40,77	42,72	44,35	59,38	39,38	34,93

Tabla 22. Estimación del número de vehículos eléctricos que requieren recarga diaria en 2030

Tiempo medio entre la llegada de vehículos eléctricos (2030):

	L	M	X	J	V	S	D
<b>ENERO</b>	38,913	38,898	38,564	40,578	30,285	47,085	54,755
<b>FEBRERO</b>	33,602	37,442	36,463	32,147	24,435	41,074	49,792
<b>MARZO</b>	41,406	39,358	39,287	36,100	26,970	43,253	51,592
<b>ABRIL</b>	33,022	32,504	27,744	26,529	25,821	40,304	40,858
<b>MAYO</b>	38,020	35,325	35,101	31,208	22,486	36,267	45,900
<b>JUNIO</b>	33,614	34,916	33,298	29,673	21,886	34,517	43,055
<b>JULIO</b>	31,347	31,685	31,422	26,534	20,604	26,367	36,251
<b>AGOSTO</b>	27,350	31,052	31,532	29,120	22,187	30,721	39,511
<b>SEPTIEMBRE</b>	36,592	35,855	35,426	31,554	23,452	37,349	44,843
<b>OCTUBRE</b>	35,939	35,664	35,212	32,587	23,216	34,053	33,852
<b>NOVIEMBRE</b>	37,157	36,992	36,944	34,820	26,169	41,227	46,023
<b>DICIEMBRE</b>	35,923	35,317	33,711	32,466	24,252	36,568	41,222

Tabla 23. Tiempo medio estimado entre la llegada de dos vehículos eléctricos consecutivos por día y mes en 2030

Además de los datos estimados previamente para modelar la demanda —contenidos en el fichero **tiempo\_entre\_llegadas.csv**, que refleja el tiempo medio entre llegadas de vehículos eléctricos en función del mes y del día de la semana—, la simulación requiere otros cinco ficheros de entrada fundamentales. En primer lugar, se introduce el archivo **configuracion\_cargadores.csv**, en el que se define la infraestructura de recarga que se desea evaluar. Durante las simulaciones, se irá variando la cantidad y combinación de los cargadores con el fin de identificar cuál es la configuración más eficiente y adecuada para absorber la demanda estimada.

El archivo **configuracion\_cargadores.csv** define la infraestructura de recarga que se desea simular. En el análisis se consideran cuatro tipos de cargadores de corriente continua, representativos de las tecnologías disponibles y previstas para el año 2030: 50 kW, 100 kW, 200 kW y 350 kW. Estas potencias cubren desde opciones de carga rápida estándar hasta soluciones de carga ultra-rápida, adecuadas para una electrolinera de pago orientada a distintos perfiles de usuarios y tiempos de recarga [11].

El límite de cola por cargador se ha fijado en 1, lo que implica que solo un vehículo puede esperar por cada punto de carga ocupado. Esta restricción busca modelar un diseño realista

y limitar la acumulación excesiva de vehículos, lo que obliga a gestionar la capacidad de forma eficiente.

En cuanto al precio de venta por kWh, se han fijado tarifas diferenciadas para cada tipo de cargador, con base en precios reales ofrecidos por operadores comerciales en España en 2024, con una ligera reducción de precios por efecto de economías de escala [33].

- 0,325 €/kWh para los cargadores de 50 kW.
- 0,35 €/kWh para los cargadores de 100 kW.
- 0,40 €/kWh para los cargadores de 200 kW.
- 0,55 €/kWh para los cargadores de 350 kW.

Estas tarifas reflejan no solo el coste asociado a la infraestructura de mayor potencia, sino también el valor añadido que representa para el usuario poder cargar más rápido. Esta diferenciación tarifaria es habitual en electrolinerías públicas y privadas, y se espera que se mantenga o incluso se amplíe en el horizonte de 2030.

tipo_cargador	potencia_kW	cantidad	limiteCola	precio_venta_euros/kWh
100kW	100	1	1	0.35
350kW	350	1	1	0.55

Tabla 24. Configuración de cargadores definida para el caso de estudio

En segundo lugar, se utiliza el fichero **tipos\_VE.csv**, que recoge los diferentes perfiles de vehículos eléctricos considerados, definidos por su capacidad de batería, la fracción media de carga con la que suelen llegar a una electrolinería, su desviación típica, y la probabilidad de aparición de cada tipo. Se ha asumido que los vehículos eléctricos recargan, de media, un 80 % de su batería [4]. Además, se ha considerado una desviación típica del 20 % sobre esa fracción para introducir variabilidad entre usuarios y reflejar comportamientos reales diversos. Se han seleccionado tres tipos de vehículos eléctricos con capacidades de 40 kWh, 70 kWh y 120 kWh para representar una muestra equilibrada del parque actual y futuro de turismos eléctricos. Estas categorías reflejan, respectivamente, modelos urbanos de gama baja, vehículos familiares de gama media y modelos de alta gama o larga autonomía. Las proporciones asignadas a cada tipo —50 % para los de 40 kWh, 30 % para los de 70 kWh y 20 % para los de 120 kWh— responden a una estimación razonada basada en la mayor presencia esperada de vehículos más asequibles y compactos en el conjunto del parque móvil, especialmente en los primeros años de transición eléctrica [42].

tipo_VE	probabilidad	bateria_media	bateria_desviacion
---------	--------------	---------------	--------------------

<b>120kWh</b>	0,2	0,6	0,2
<b>70kWh</b>	0,3	0,6	0,2
<b>40kWh</b>	0,5	0,6	0,2

Tabla 25. Tipología de vehículos eléctricos considerada en el caso de estudio

Para representar el escenario de funcionamiento de la electrolinera en el contexto del año 2030 —año objetivo del caso de estudio—, se ha definido una duración de simulación equivalente a un año natural completo en el archivo **parámetros\_simulacion.csv**, es decir, 525.600 minutos (365 días). Este enfoque permite analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones anuales representativas de demanda, precios y uso de la infraestructura. Se ha optado por realizar una única réplica, dado que el objetivo no es evaluar la variabilidad estadística entre ejecuciones, sino obtener una visión agregada del rendimiento del sistema durante un año tipo. No obstante, el programa permite aumentar el número de réplicas si se desea mejorar la robustez estadística de los resultados.

<b>tiempo_simulacion_min</b>	<b>numero_replicaciones</b>	<b>fecha_inicio_simulacion</b>
<b>525.600</b>	1	01-01-2030

Tabla 26. Parámetros generales de simulación definidos para el caso de estudio

El archivo **parametros\_economicos.csv** contiene los valores necesarios para calcular los costes anuales de operación y la inversión inicial de la electrolinera, así como su amortización a lo largo del tiempo. Estos parámetros permiten estimar el coste total anual, desglosado en mantenimiento, explotación y amortización de la infraestructura. A continuación, se describen los campos utilizados:

- **coste\_mantenimiento\_pct (0,07):** Representa el porcentaje anual del coste de inversión inicial (CAPEX) que se destina al mantenimiento de los cargadores. En este caso, se ha asumido un 7 % anual, una estimación coherente con estudios técnicos y prácticas habituales en el sector de infraestructuras eléctricas y estaciones de servicio [4].
- **vida\_util\_cargador\_anos (15 años):** Se establece una vida útil de 15 años para cada cargador, plazo razonable en términos técnicos y contables, utilizado para amortizar el coste de inversión de forma lineal. Esta duración permite repartir el CAPEX en cuotas anuales que reflejan la depreciación del equipo con el tiempo.
- **coste\_explotacion\_anual (50.000 €):** Corresponde a los costes fijos anuales de operación de la electrolinera, independientes del número de cargadores. Incluye gastos como gestión, limpieza, supervisión técnica, servicios auxiliares, seguros y sistemas informáticos de gestión. Este valor se mantiene constante durante toda la simulación [4].

- **inversion\_fija\_por\_cargador\_euros (20.000 €):** Este valor representa el coste base por cada cargador instalado, independientemente de su potencia. Incluye la compra del equipo, obra civil, instalación eléctrica, sistemas de control y permisos. Es un coste de inversión inicial que se suma al coste variable.
- **inversion\_variable\_cargador\_euros/kW (300 €/kW):** Se trata del componente de inversión que depende de la potencia del cargador. Refleja el sobre coste asociado a instalar equipos de mayor capacidad, cableado específico, protecciones o infraestructura auxiliar. Por ejemplo, un cargador de 100 kW supone un coste adicional de 30.000 €, mientras que uno de 350 kW implica 105.000 € adicionales.
- **precio\_potencia\_anual\_euros/kW (50 €/kW):** Este parámetro representa el coste anual por kilovatio contratado con la compañía eléctrica, asociado a la potencia máxima que la electrolinera necesita tener disponible. Se asume que esta potencia máxima equivale a la suma de las potencias nominales de todos los cargadores instalados, lo cual permite garantizar el suministro simultáneo en caso de máxima demanda. Por tanto, el coste total de este concepto depende directamente del número y tipo de cargadores. El valor de 50 €/kW se basa en estimaciones medias de precios de acceso a la potencia en el mercado español para suministros en baja tensión con alta potencia contratada [43].

Variable	valor
coste_mantenimiento_pct	0,07
vida_util_cargador_anos	15
coste_explotacion_anual_euros	50.000
inversion_fija_por_cargador_euros	20.000
inversion_variable_cargador_euros/kW	300
precio_potencia_anual_euros/kW	50

Tabla 27. Parámetros económicos utilizados en la simulación del caso de estudio

El archivo **precio\_compra\_por\_dia\_y\_mes.csv** contiene una tabla con los precios de compra de electricidad (en €/kWh) diferenciados por día de la semana y mes del año. Esta variabilidad permite reflejar los cambios estacionales y semanales típicos del mercado mayorista español, aportando realismo al cálculo de costes operativos.

Los valores han sido estimados a partir de datos históricos del operador del mercado eléctrico [43] asumiendo que no se producirán variaciones estructurales significativas en los precios de adquisición de energía hasta 2030.

Finalmente, el estudio comparativo de las distintas configuraciones de cargadores — incluyendo potencias de 50, 100, 200 y 350 kW — se desarrolla en el 0, dedicado al análisis

de resultados. En dicho apartado se evalúa el comportamiento del sistema bajo cada configuración, manteniendo constantes los datos de entrada definidos para este caso de estudio, con el objetivo de identificar cuáles son las combinaciones más adecuadas en términos de rentabilidad económica, eficiencia operativa y calidad del servicio prestado.

## DISEÑO

### ANÁLISIS INICIAL APLICANDO TEORÍA DE COLAS

Se presenta un análisis teórico del funcionamiento de una estación de carga para vehículos eléctricos, basado en la teoría de colas. Se utiliza el modelo M/M/c para evaluar métricas clave como los tiempos de espera, la ocupación del sistema y la eficiencia general del servicio. Este estudio preliminar permitió hacerse una idea general del funcionamiento de la electrolinera y de los resultados esperables antes de implementar la simulación en Arena.

#### Parámetros del Sistema:

- Número de cargadores (c): 2
- Tiempo medio entre llegadas: 34.69 minutos (media de todos los tiempos entre la llegada de dos VE consecutivos del archivo tiempo\_entre\_llegadas.csv)
- Tasa de llegada  $\lambda = 1 / \text{tiempo entre llegadas} = 0.0288$  vehículos/min
- Tiempo medio de carga estimado: 12.26 minutos

Para llegar a este valor se parte de las capacidades en tipos\_VE.csv (Tabla 5) y de su batería media a cargar.

$$\text{Energía a cargar (kWh)} = \text{capacidad batería} \times \text{batería\_media}$$

*Ecuación 18. Cálculo de la energía demandada por un vehículo eléctrico en función de su batería*

Para cada combinación de coche y cargador se calcula el tiempo de carga en minutos con la fórmula:

$$\text{Tiempo de carga (min)} = \left( \frac{\text{Energía a cargar (kWh)}}{\text{Potencia del cargador (kW)}} \right) \times 60$$

*Ecuación 19. Cálculo del tiempo estimado de carga en función de la energía demandada y la potencia del cargador*

Cada combinación se pondera según la probabilidad del tipo de coche y la proporción del tipo de cargador (Tabla 6).

$$\text{Proporción}_{\text{cargador}_j} = \frac{\text{Cantidad}_{\text{cargador}_j}}{\text{Total}_{\text{cargadores}}}$$

*Ecuación 20. Cálculo de la proporción de cada tipo de cargador sobre el total de la infraestructura*

*Tiempo medio*

$$= \Sigma \left( \text{Tiempo}_{ij} \times \text{Probabilidad}_{\text{coche}_i} \times \text{Proporción}_{\text{cargador}_j} \right)$$

*Ecuación 21. Cálculo del tiempo medio de carga ponderado y tasa de servicio del sistema*

- Tasa de servicio  $\mu = 1 / \text{tiempo medio de carga} = 0.0816$  vehículos/min/cargador

### Resultados obtenidos

- Factor de Utilización ( $\rho$ )

$$\rho = \lambda / (c \times \mu)$$

Ecuación 6. Factor de utilización del sistema

$$\rho = 0.0288 / (2 \times 0.0816) = 0.1765$$

Interpretación: los cargadores están ocupados el 17.65% del tiempo. Como  $\rho < 1$ , el sistema es estable.

- Tiempo Promedio en el Sistema (W)

$$W = \frac{1}{\left( 0.0816 - \left( \frac{0.0288}{2} \right) \right)} = \frac{1}{0.0672} = 14.88 \text{ minutos}$$

*Ecuación 22. Tiempo promedio en el sistema*

- Tiempo promedio en la cola ( $W_q$ )

$$W_q = \frac{0.0288}{[2 \times 0.0816 \times (0.0816 - 0.056)]} = \frac{0.0288}{0.004179} \approx 6.89 \text{ minutos}$$

*Ecuación 23. Tiempo promedio en la cola*

Este análisis teórico basado en la teoría de colas M/M/c constituye una simplificación del sistema real, ya que no considera aspectos como los límites de las colas ni el comportamiento individual de los cargadores ante distintas condiciones de demanda. Sin embargo, resultó útil como punto de partida para comprender el funcionamiento básico de la electrolinera, estimar valores iniciales y diseñar la estructura del modelo en Arena, que posteriormente se ha comparado con el modelo implementado en Python para evaluar su validez y mejorar la precisión de los resultados.

## COMPROBACIÓN ARENA

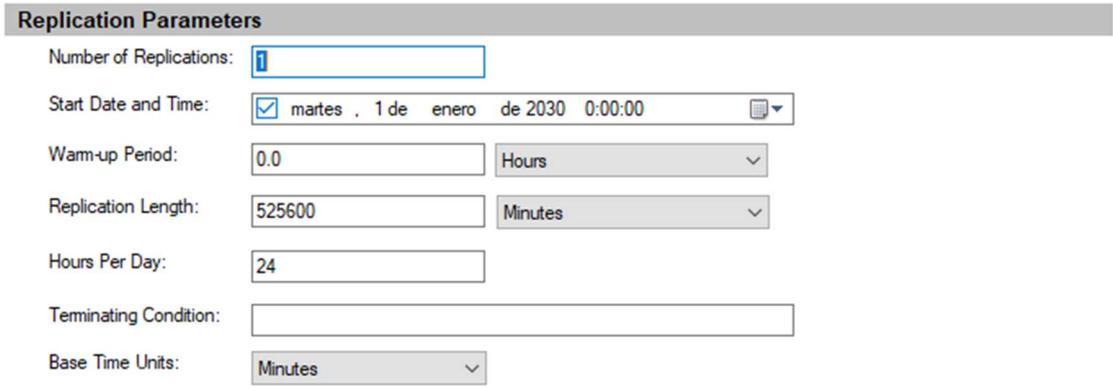
Se ha realizado un proceso de comprobación realizado con el software de simulación Arena para verificar la coherencia de los resultados obtenidos en distintas configuraciones de simulación. Concretamente, se han evaluado tres configuraciones diferentes de electrolineras, manteniendo constante la demanda de vehículos eléctricos en todos los casos. El propósito de este análisis es comprobar si los resultados relacionados con la formación de colas —como tiempos de espera, longitud media de las colas y número de rechazos— se mantienen dentro de un margen razonable de variación entre configuraciones similares.

Este margen de variación es completamente normal en simulaciones de eventos discretos, ya que cada ejecución puede seguir un camino distinto debido al uso de variables aleatorias, controladas por diferentes semillas. Por ello, incluso bajo condiciones idénticas, es esperable que se produzcan ligeras diferencias entre ejecuciones. El análisis comparativo entre los tres casos permite valorar la robustez de los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo la comparación entre los resultados obtenidos en Arena y los generados por el programa en Python, fue necesario realizar algunas adaptaciones en los valores calculados por este último. En particular, el tiempo medio de espera que proporciona el

modelo en Python solo tiene en cuenta a los vehículos que han sido atendidos, excluyendo aquellos que abandonan la electrolinera sin recibir servicio. Por ello, para asegurar una comparación coherente con los resultados de Arena —donde los tiempos pueden incluir también entidades con tiempos nulos si no han sido atendidas— se ajustaron o interpretaron los datos de forma que ambos entornos reflejaran métricas comparables.

Se emplean los mismos parámetros del tiempo de simulación en ambos programas. Se emplea una única replicación con una duración total de 525.600 minutos (un año, específicamente el 2030), sin periodo de calentamiento, usando minutos como unidad base de tiempo.



**Replication Parameters**

Number of Replications:

Start Date and Time:  martes , 1 de enero de 2030 0:00:00

Warm-up Period:  Hours

Replication Length:  Minutes

Hours Per Day:

Terminating Condition:

Base Time Units:

*Figura 13. Configuración de parámetros de replicación para la simulación del caso de estudio en Arena Simulation*

## **Primera simulación**

En la primera comprobación se dispone de un cargador de 100 kW y otro de 350 kW.

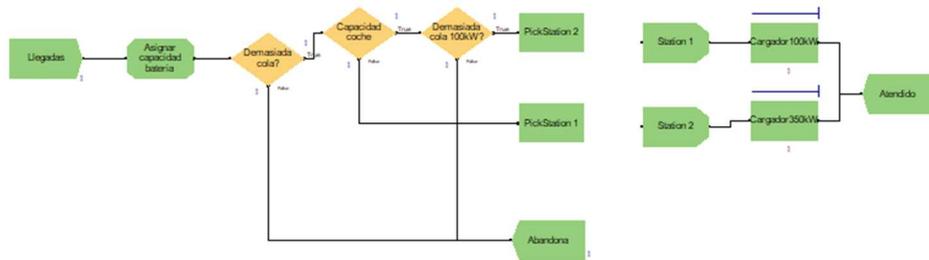


Figura 14. Esquema lógico del modelo de simulación en Arena utilizado para la primera comprobación

## 1) Configuración de Cargadores

Sube 'configuracion\_cargadores.csv'

Drag and drop file here  
 Limit 200MB per file • CSV

Browse files

Usando configuración de ejemplo.

	tipo_cargador	potencia_kW	cantidad	limite_cola	precio_venta_euros/kWh
0	100kW	100	1	1	0.35
1	350kW	350	1	1	0.4

Figura 15. Configuración de cargadores utilizada en la simulación de la primera comprobación

A continuación, se realiza un análisis de las métricas más relevantes:

Parámetros	Arena	Python	Diferencial
<b>Demanda</b>	15.299	15.808	3,33%
<b>VE atendidos</b>	13.212	13.597	2,91%
<b>VE que abandonan</b>	2.087	2.211	5,94%

<b>Tasa de abandono</b>	0,136	0,140	2,53%
<b>Tiempo promedio en el sistema (min)</b>	33,570	32,840	2,18%
<b>Tiempo máximo en el sistema (min)</b>	181,255	165,290	8,81%
<b>Tiempo promedio en cola de cargadores (min)</b>	9,051	9,126	0,83%
<b>Tiempo máximo en cola de cargadores (min)</b>	101,765	96,680	5,00%
<b>100kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	101,765	96,680	5,00%
<b>100kW - Ocupación media (%)</b>	66,510	66,230	0,42%
<b>350kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	26,959	23,320	13,50%
<b>350kW - Ocupación media (%)</b>	4,866	5,080	4,40%

*Tabla 28. Comparación de resultados entre Arena y Python en la primera comprobación*

### **Análisis**

La concordancia entre ambos entornos es elevada. Los errores relativos son bajos en métricas agregadas como el tiempo promedio en el sistema (2,18%) o la ocupación media (0,42% en cargadores de 100 kW y 4,40% en los de 350 kW). Las mayores desviaciones se observan en los tiempos máximos de espera, con diferencias de hasta el 13,5%, y en la tasa de abandono, aunque esta última es muy baja en términos absolutos. Estas discrepancias en valores extremos son esperables debido al carácter estocástico de la simulación, ya que pequeños cambios en los eventos aleatorios pueden generar variaciones significativas en los máximos registrados.

### **Segunda simulación**

En la segunda comprobación se dispone de un cargador de 50 kW y uno de 350 kW.

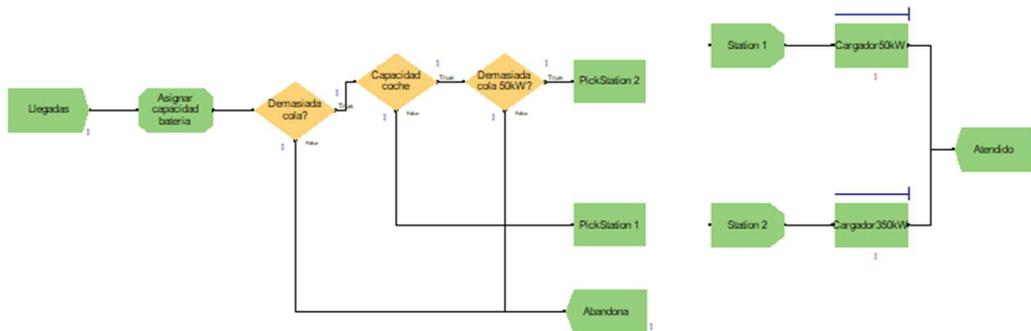


Figura 16. Esquema lógico del modelo de simulación en Arena utilizado para la segunda comprobación

## 1) Configuración de Cargadores

Sube 'configuracion\_cargadores.csv'



Drag and drop file here

Limit 200MB per file • CSV

Browse files

Usando configuración de ejemplo.

	tipo_cargador	potencia_kW	cantidad	limite_cola	precio_venta_euros/kWh
0	50kW	50	1	1	0.35
1	350kW	350	1	1	0.4

Figura 17. Configuración de cargadores utilizada en la simulación de la segunda comprobación

A continuación, se realiza un análisis de las métricas más relevantes:

Parámetros	Arena	Python	Diferencial
<b>Demanda</b>	15.595	15.807	1,36%
<b>VE atendidos</b>	11.474	11.616	1,24%
<b>VE que abandonan</b>	4.121	4.191	1,70%
<b>Tasa de abandono</b>	0,264	0,265	0,33%

<b>Tiempo promedio en el sistema (min)</b>	50,584	49,680	1,79%
<b>Tiempo máximo en el sistema (min)</b>	310,678	347,910	11,98%
<b>Tiempo promedio en cola de cargadores (min)</b>	17,571	17,431	0,80%
<b>Tiempo máximo en cola de cargadores (min)</b>	190,230	208,680	9,70%
<b>50kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	190,230	208,680	9,70%
<b>50kW - Ocupación media (%)</b>	88,540	87,510	1,16%
<b>350kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	22,760	26,450	16,21%
<b>350kW - Ocupación media (%)</b>	9,410	9,480	0,74%

*Tabla 29. Comparación de resultados entre Arena y Python en la segunda comprobación*

### **Análisis**

Esta segunda comprobación del modelo desarrollado en Python frente al original en Arena confirma nuevamente su fiabilidad, con errores relativos inferiores al 2 % en la mayoría de los parámetros clave, como demanda, VE atendidos, tasa de abandono y tiempos promedio. Aunque persisten pequeñas discrepancias en los valores máximos, atribuibles a una mayor sensibilidad del modelo en Python ante casos extremos, los resultados globales refuerzan la validez del enfoque implementado.

### **Tercera simulación**

En la tercera comprobación se dispone de un cargador de 50 kW, uno de 100 kW y otro de 350 kW.

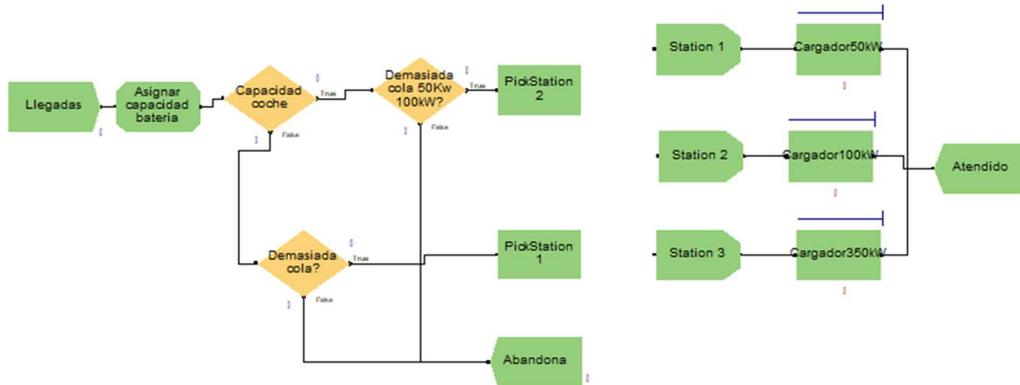


Figura 18. Esquema lógico del modelo de simulación en Arena utilizado para la tercera comprobación

## 1) Configuración de Cargadores

Sube 'configuracion\_cargadores.csv'


 Drag and drop file here  
 Limit 200MB per file • CSV
 Browse files

Usando configuración de ejemplo.

	tipo_cargador	potencia_kW	cantidad	limite_cola	precio_venta_euros/kWh
0	50kW	50	1	1	0.35
1	100kW	100	1	1	0.4
2	350kW	350	1	1	0.5

Figura 19. Configuración de cargadores utilizada en la simulación de la tercera comprobación

A continuación, se realiza un análisis de las métricas más relevantes:

Parámetros	Arena	Python	Diferencial
<b>Demanda</b>	15.739	15.808	0,44%
<b>VE atendidos</b>	14.883	14.987	0,70%

<b>VE que abandonan</b>	856	821	4,09%
<b>Tasa de abandono</b>	0,054	0,052	4,51%
<b>Tiempo promedio en el sistema (min)</b>	65,011	63,980	1,59%
<b>Tiempo máximo en el sistema (min)</b>	335,67	381,36	13,61%
	6	0	
<b>Tiempo promedio en cola de cargadores (min)</b>	21,579	22,480	4,18%
<b>Tiempo máximo en cola de cargadores (min)</b>	202,84	206,05	1,58%
	6	0	
<b>50kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	202,84	206,05	1,58%
	6	0	
<b>50kW - Ocupación media (%)</b>	88,444	87,740	0,80%
<b>100kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	86,853	102,46	17,97%
		0	
<b>100kW - Ocupación media (%)</b>	39,555	38,640	2,31%
<b>350kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	25,685	24,570	4,34%
<b>350kW - Ocupación media (%)</b>	2,063	1,940	5,96%

Tabla 30. Comparación de resultados entre Arena y Python en la tercera comprobación

## Análisis

En esta tercera comprobación del modelo desarrollado en Python, los resultados vuelven a mostrar una alta concordancia con el modelo original en Arena, con errores relativos inferiores al 5 % en los principales parámetros, como demanda, VE atendidos, tasa de abandono y tiempos promedio. Aunque se observan algunas discrepancias en los valores máximos, especialmente en el tiempo de espera del segundo cargador de 100 kW, estas se deben a eventos puntuales y no afectan a la validez global del modelo.

## Conclusión

El proceso de verificación mediante Arena ha permitido validar la coherencia y fiabilidad del modelo desarrollado en Python en tres escenarios distintos de configuración de electrolineras. En todos los casos, los resultados obtenidos en ambos entornos presentan una alta concordancia, con errores relativos generalmente inferiores al 5 % en los parámetros clave, como la demanda, el número de VE atendidos, la tasa de abandono y los tiempos

promedio en el sistema y en cola. En conjunto, los tres casos analizados permiten concluir que la implementación en Python reproduce de forma robusta y fiable el comportamiento del sistema modelado originalmente en Arena, constituyendo una herramienta adecuada para el análisis y simulación de electrolinerías.

## **Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Tras el desarrollo del simulador y su aplicación al caso de estudio propuesto, este capítulo presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos bajo diferentes configuraciones de infraestructura. La herramienta desarrollada permite evaluar con precisión el comportamiento de la electrolinera frente a una demanda realista proyectada para el año 2030, considerando aspectos tanto técnicos como económicos. A partir de esta base, se analizan distintas combinaciones de cargadores con el fin de valorar su impacto en el rendimiento del sistema, la calidad del servicio ofrecido a los usuarios y la rentabilidad del proyecto.

### **7.1 OBJETIVO DE ANÁLISIS**

El objetivo principal de este análisis es identificar cuál o cuáles son las configuraciones de cargadores que resultan más adecuadas para la electrolinera definida en el caso de estudio, considerando como criterio prioritario la rentabilidad económica, pero sin descuidar indicadores clave relacionados con la eficiencia operativa y la calidad del servicio, como el tiempo medio de espera, el porcentaje de VE que abandonan sin ser atendidos o la ocupación media de los cargadores. Para ello, se han evaluado múltiples combinaciones de cargadores de 50, 100, 200 y 350 kW, manteniendo constantes las condiciones de entrada detalladas en el Capítulo 5. : misma demanda anual, estacionalidad, distribución de tipos de vehículos y parámetros económicos asociados. Este análisis no solo permite determinar qué composición de infraestructura optimiza los resultados, sino que también sirve como validación funcional del simulador, mostrando su utilidad como herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas en el diseño de estaciones de recarga.

### **7.2 ENFOQUE METODOLÓGICO**

Todas las simulaciones realizadas en este capítulo comparten los mismos parámetros de entrada definidos previamente para el caso de estudio desarrollado. En concreto, se utiliza la misma localización (un tramo de la A-4 próximo a Aranjuez), la demanda proyectada para el año 2030 con su correspondiente estacionalidad mensual y variación diaria, y los precios

de compra de energía diferenciados por día de la semana y mes. Asimismo, se mantiene la segmentación de los vehículos eléctricos en tres categorías según su capacidad de batería (40, 70 y 120 kWh), y se considera una configuración de colas en la que cada cargador admite como máximo un vehículo en espera. Cada simulación tiene una duración de un año completo (525.600 minutos) y se ha ejecutado con una única réplica, dado que el objetivo de esta fase es obtener una primera comparación de resultados bajo condiciones idénticas.

Con esta base, se ha llevado a cabo un análisis exploratorio evaluando diferentes configuraciones de infraestructura, variando el número y tipo de cargadores disponibles. Para cada escenario se han recogido los indicadores más relevantes: rentabilidad económica (ROI), tiempo medio de espera, porcentaje de vehículos que deben esperar, tasa de abandono y ocupación media de los cargadores. Esta primera fase del análisis tiene como finalidad acotar el conjunto de configuraciones con mejor comportamiento global. Las combinaciones que presenten un equilibrio favorable entre rentabilidad y calidad del servicio serán posteriormente analizadas en mayor profundidad, con el fin de identificar la solución más adecuada para el diseño de la electrolinera simulada.

### **7.3 COMPARACIÓN DE CONFIGURACIONES**

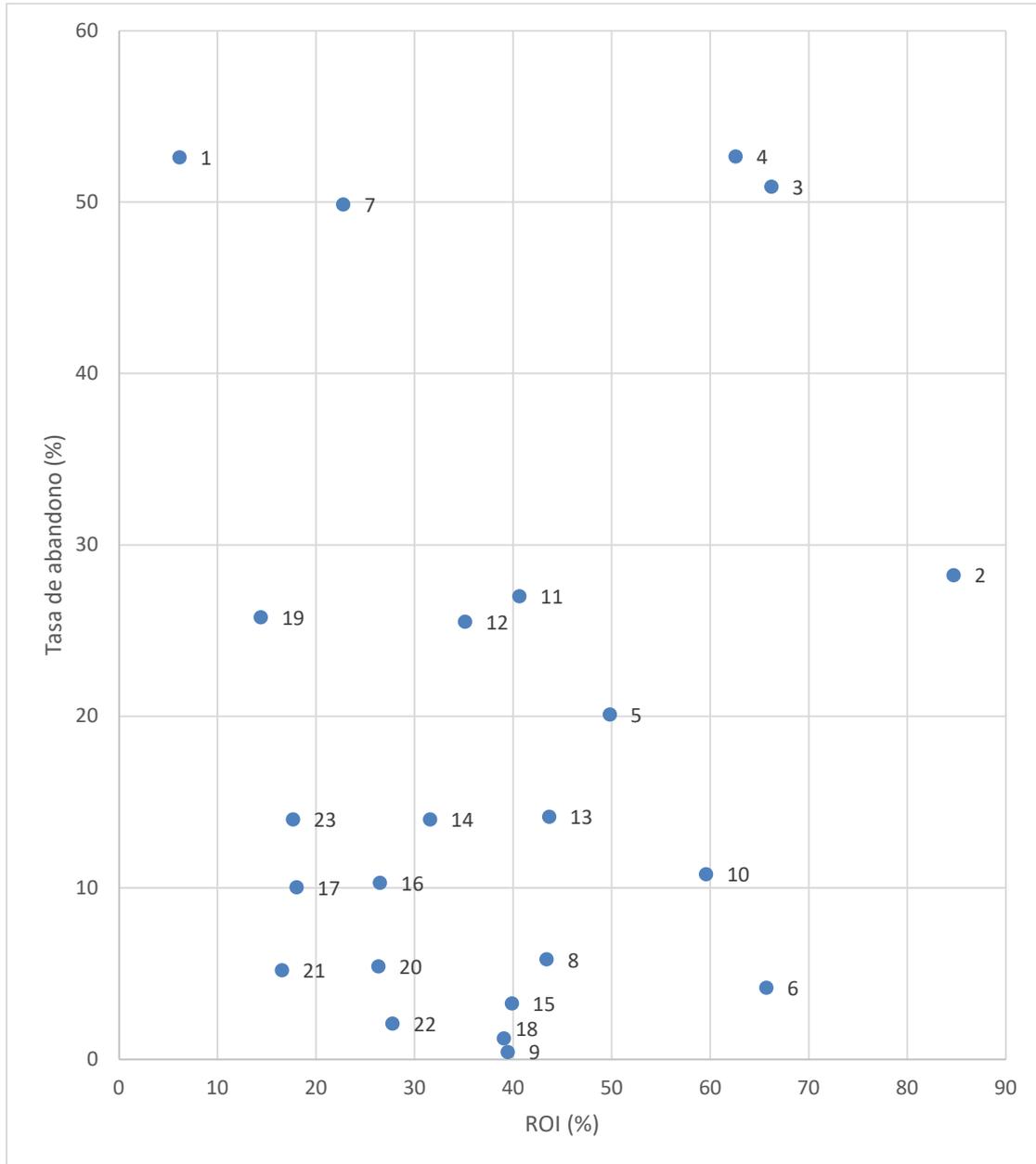
A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las distintas configuraciones de cargadores evaluadas. El objetivo es comparar de forma global los indicadores clave y descartar aquellas opciones con un rendimiento claramente inferior, como paso previo a un análisis más detallado de las configuraciones más prometedoras.

Con el objetivo de reducir el número de combinaciones y centrar el análisis en escenarios realistas, se ha limitado la potencia total instalada a un máximo de 500 kW. Tal como se observa en las tablas de comprobación del modelo, a partir de ese umbral la infraestructura es capaz de atender la demanda sin saturación, y algunos cargadores presentan ocupaciones muy bajas, lo que indica una sobredotación poco eficiente. Además, se ha fijado un máximo de tres cargadores por configuración para mantener el diseño dentro de un tamaño razonable y representativo de una electrolinera interurbana compacta, como la planteada en el caso de estudio.

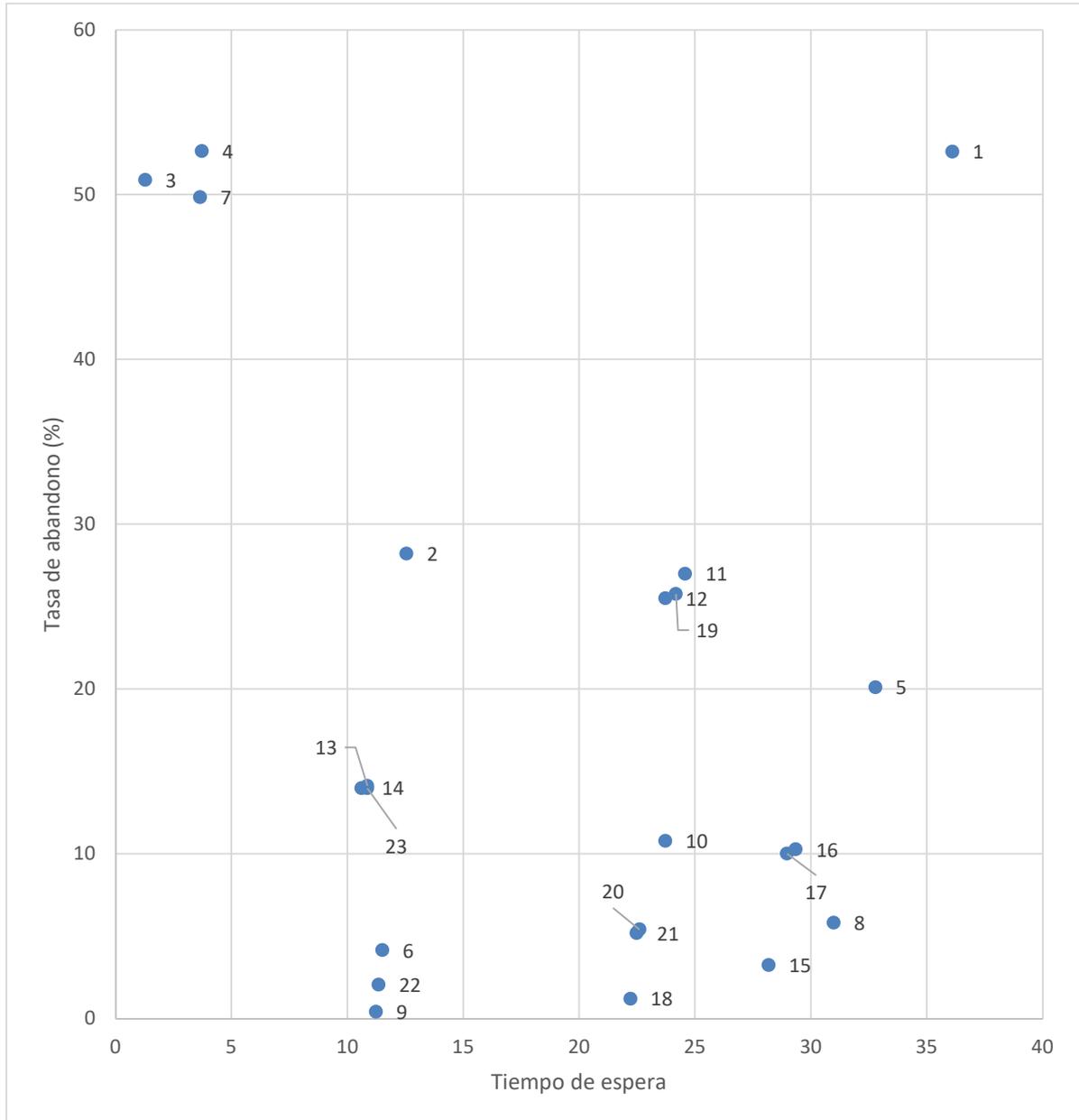
<b>Caso</b>	<b>Configuración</b>	<b>ROI (%)</b>	<b>Beneficio neto anual (€)</b>	<b>Ocupación media (%)</b>	<b>% VE que esperan</b>	<b>Tiempo medio de espera (min)</b>	<b>Tasa de abandono (%)</b>
1	1×50kW	6,15	2.154,14	87,51	76,13	36,11	52,61
2	1×100kW	84,71	42.354,92	66,35	54,86	12,55	28,23
3	1×350kW	66,22	82.771,83	17,92	16,9	1,27	50,9
4	1×200kW	62,58	5.0065,5	30,13	27,86	3,72	52,65
5	2×50kW	49,82	38.874,22	73,68	68,86	32,78	20,11
6	2×100kW	65,71	6.5712,7	44,25	50,31	11,51	4,16
7	2×200kW	22,77	36.425,52	15,95	27,12	3,64	49,85
8	3×50kW	43,41	45.575,85	57,96	65,09	30,98	5,82
9	3×100kW	39,47	59.203,79	30,6	49,42	11,23	0,42
10	1×50kW 1×100kW	59,58	50.639,71	62,94	60,84	23,72	10,79
11	1×50kW 1×200kW	40,65	46.748,39	51,91	57,21	24,57	27
12	1×50kW 1×350kW	35,12	56.192,77	48,5	54,8	23,72	25,51
13	1×100kW 1×200kW	43,67	56.768,59	37,55	48,84	10,86	14,14
14	1×100kW 1×350kW	31,58	55.258,52	35,66	48,07	10,61	13,99
15	2×50kW 1×100kW	39,87	47.849,02	54,22	63,1	28,18	3,25
16	2×50kW 1×200kW	26,5	39.751,98	51,06	63,3	29,34	10,28

<b>17</b>	2×50kW 1×350kW	18,02	35.147,02	50,1	62,62	28,97	10,02
<b>18</b>	1×50kW 2×100kW	39,05	52.717,74	44,96	57,86	22,21	1,22
<b>19</b>	1×50kW 2×200kW	14,4	28.074,94	34,86	56,74	24,17	25,77
<b>20</b>	1×50kW 1×100kW 1×200kW	26,33	43.439,47	43,17	58,67	22,6	5,42
<b>21</b>	1×50kW 1×100kW 1×350k	16,54	34.725,35	42,77	58,28	22,48	5,19
<b>22</b>	2×100kW 1×200kW	27,77	49.982,93	29,96	49,86	11,35	2,07
<b>23</b>	1×100kW 2×200kW	17,65	37.060,97	25,15	49,19	10,86	13,99

*Tabla 31. Indicadores clave de rendimiento para cada configuración de infraestructura simulada.*



*Figura 20. Relación entre ROI y tasa de abandono en cada caso analizado.*



*Figura 21. Relación entre el tiempo de espera y la tasa de abandono en configuraciones simuladas*

Partiendo de la Ecuación 11 se elabora una tabla con la inversión inicial que se necesita para cada cargador:

Configuración	CAPEX
<b>1</b>	€ 35.000
<b>2</b>	€ 50.000
<b>3</b>	€ 125.000

4	€ 80.000
5	€ 70.000
6	€ 100.000
7	€ 160.000
8	€ 105.000
9	€ 150.000
10	€ 85.000
11	€ 115.000
12	€ 160.000
13	€ 130.000
14	€ 175.000
15	€ 120.000
16	€ 150.000
17	€ 195.000
18	€ 135.000
19	€ 195.000
20	€ 165.000
21	€ 210.000
22	€ 180.000
23	€ 210.000

Tabla 32. CAPEX por configuración

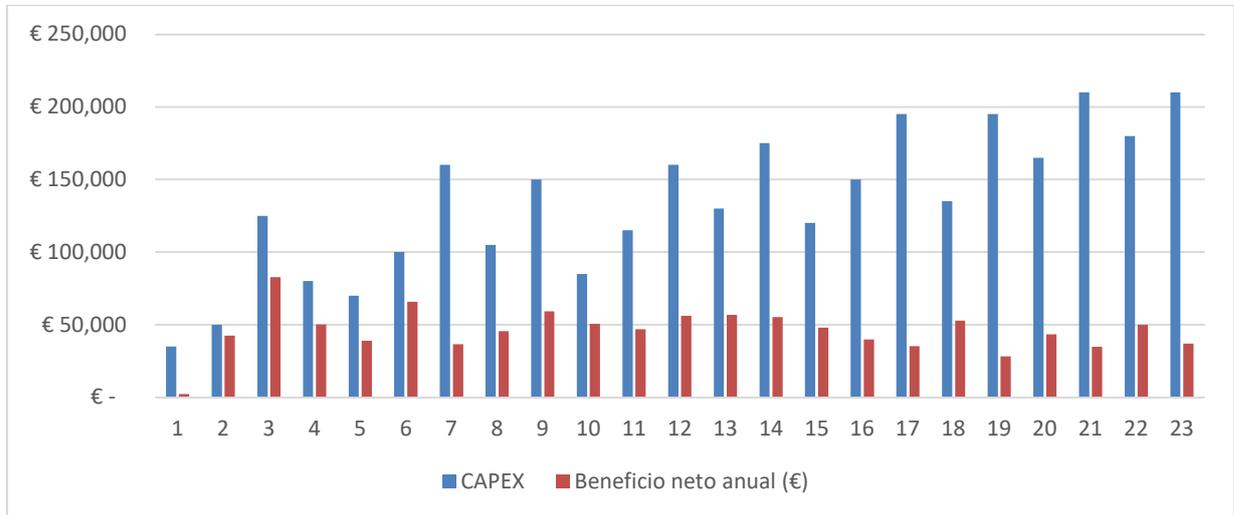
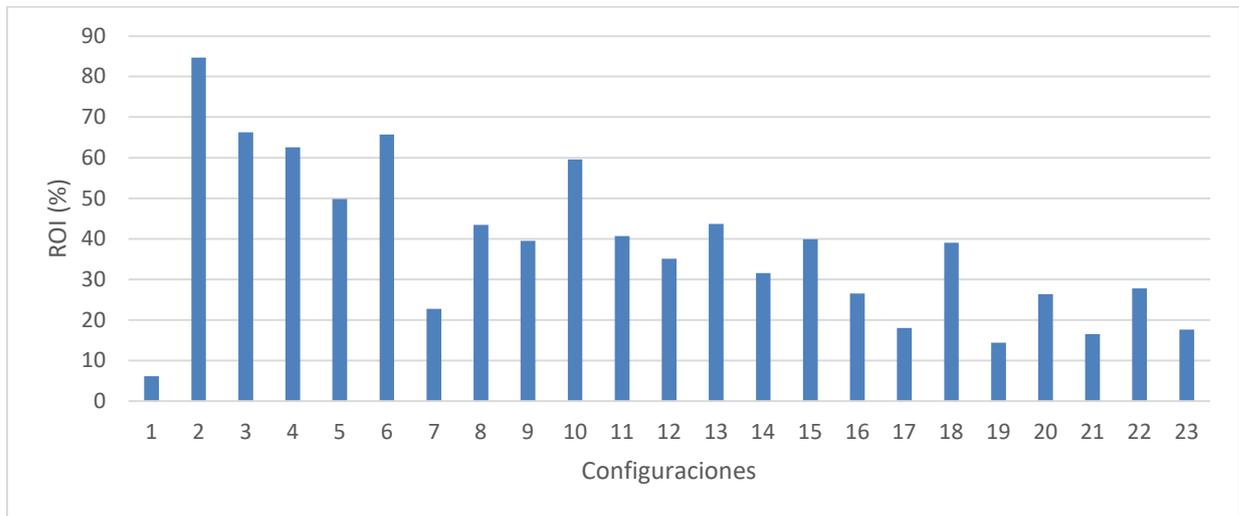


Figura 22. Relación entre el coste de inversión inicial y el beneficio neto anual para cada una de las configuraciones evaluadas.



*Figura 23. Rentabilidad anual (ROI) obtenida en cada configuración simulada.*

A partir de los resultados presentados en la Tabla 31, la Figura 20 y la Figura 23, se puede realizar una primera evaluación del comportamiento global de las distintas configuraciones simuladas. Tal como muestra la Figura 20, varias opciones superan ampliamente el 40 % de rentabilidad anual, e incluso algunas alcanzan valores cercanos o superiores al 60 % de ROI. No obstante, es importante señalar que estas cifras tan elevadas responden a un contexto simulado idealizado, en el que no se han considerado aún costes indirectos como licencias, mantenimiento correctivo, impuestos o periodos de inactividad. Tampoco se ha tenido en cuenta en el CAPEX la necesidad de un centro de transformación y sus gastos asociados, que serían imprescindibles en muchas instalaciones reales. Además, el modelo parte de una demanda estable durante todo el año y una infraestructura sin fallos, lo que refuerza la rentabilidad teórica obtenida. En cualquier caso, el simulador sí permite comparar de forma consistente la rentabilidad relativa entre configuraciones, lo que resulta útil para identificar las opciones más eficientes en términos económicos. Cabe destacar, además, que se han mantenido costes similares a los actuales en cuanto a infraestructura y operación, aunque es previsible que estos disminuyan en el futuro debido a una mayor oferta de tecnología y a economías de escala.

La Figura 22 complementa este análisis al representar de forma conjunta el coste de inversión inicial (CAPEX) y el beneficio neto anual de cada configuración. Esta visualización permite

identificar de manera directa qué alternativas ofrecen un mejor equilibrio entre el esfuerzo inversor requerido y la rentabilidad obtenida. En ella se observa que algunas configuraciones con un CAPEX moderado logran beneficios anuales comparables a otras mucho más costosas. Esta perspectiva resulta especialmente útil para operadores con recursos limitados o que buscan reducir el tiempo de recuperación de la inversión inicial.

Por otro lado, el gráfico de dispersión de la Figura 23 pone de manifiesto que no todas las configuraciones con alto ROI garantizan un buen nivel de servicio. Algunas, como la configuración 2 ( $1 \times 100$  kW), presentan un retorno muy elevado pero una tasa de abandono superior al 25 %. Esto se explica por la limitación en el número de cargadores disponibles, que, a pesar de su rentabilidad, no alcanzan a cubrir la demanda con un nivel de servicio aceptable. En cambio, otras configuraciones, como la 6 ( $2 \times 100$  kW), combinan un ROI elevado con un abandono muy bajo, situándose en la zona más favorable del gráfico. Esta comparación inicial permite descartar aquellas opciones que, aunque rentables, penalizan claramente al usuario, y acotar el conjunto de combinaciones que serán analizadas en mayor profundidad en el siguiente apartado.

#### **7.4 CONFIGURACIONES ÓPTIMAS Y ANÁLISIS DETALLADO**

Tras la comparación general de resultados, se han seleccionado tres configuraciones para ser analizadas en mayor profundidad. La elección se ha basado en su comportamiento especialmente destacado en términos de rentabilidad, calidad del servicio o interés estratégico. En primer lugar, se incluye la configuración  $1 \times 50$  kW +  $2 \times 100$  kW, que presenta un excelente equilibrio entre rentabilidad (ROI del 39,05 %), baja tasa de abandono (1,22 %) y una alta ocupación de los cargadores. También se analiza la opción  $2 \times 100$  kW, con un ROI aún más elevado (65,71 %) y un nivel de servicio muy competitivo, lo que la convierte en una de las más eficientes del conjunto. Por último, se ha incluido la configuración  $1 \times 350$  kW, que destaca por tener el beneficio neto anual más alto (82.771,83 €) y un ROI del 66,22 %, pese a una tasa de abandono elevada, como caso representativo de un posible modelo de electrolinera orientada a vehículos eléctricos de gama alta, que podrían justificar una

estrategia de servicio más exclusiva y especializada. Los resultados completos de estas tres simulaciones pueden consultarse en el ANEXO II.

#### **7.4.1 Configuración 1×50 kW + 2×100 kW**

Esta configuración ha demostrado ser una de las más equilibradas en cuanto a rentabilidad, eficiencia y calidad del servicio. Con un ROI del 39,05 % y un beneficio neto anual de 52.717,74 €, ofrece un rendimiento económico sólido. El sistema atiende a un total de 15.612 vehículos al año (aproximadamente 43 al día), con una tasa de abandono muy baja del 1,22 %. Más de la mitad de los usuarios deben esperar (57,86 %), con un tiempo medio en cola de 22,21 minutos. La longitud máxima de la cola registrada ha sido de tres vehículos, coincidiendo con el límite impuesto en la propia configuración del modelo.

En cuanto a la distribución de uso, el cargador de 50 kW presenta una ocupación del 87,61 %, mientras que los de 100 kW alcanzan una media combinada del 23,63 %. La energía total suministrada asciende a 796,484 MWh, con un reparto relativamente equilibrado entre los tres tipos de vehículos: 296,279 MWh para los de 120 kWh, 256,968 MWh para los de 70 kWh y 243,235 MWh para los de 40 kWh. Este dato refleja una buena adaptabilidad de la infraestructura a la demanda heterogénea, permitiendo cubrir de forma eficiente tanto trayectos de larga distancia como recargas intermedias.

#### **7.4.2 Configuración 2×100 kW**

La segunda configuración seleccionada consiste en dos cargadores de 100 kW, lo que permite una infraestructura compacta y rentable. El ROI alcanza un 65,71 %, uno de los más altos entre las configuraciones evaluadas, con un beneficio neto anual de 65.712,70 €. Esta elevada rentabilidad se debe, en parte, a que se ha prescindido del cargador de menor potencia presente en la configuración anterior, lo que ha reducido la inversión inicial. Aun así, el sistema ha sido capaz de hacer frente a la demanda de forma razonable, manteniendo un nivel de servicio aceptable y atendiendo a 15.150 vehículos (41,5 diarios), con una tasa de abandono del 4,16 %. La energía suministrada anualmente asciende a 775,526,18 MWh.

Aunque los indicadores de servicio son algo menos favorables que en la configuración anterior, los resultados siguen siendo satisfactorios: el 50,31 % de los usuarios espera para cargar, con un tiempo medio en cola de 11,51 minutos. El tiempo de carga medio es de 30,7 minutos, lo que permite mantener una rotación adecuada.

En cuanto al reparto de energía suministrada por tipo de vehículo, los datos muestran una distribución bastante equilibrada: se entregaron 289,869 MWh a vehículos de 120 kWh, 248,432 MWh a los de 70 kWh y 237,225 MWh a los de 40 kWh. Esta homogeneidad indica que la infraestructura es capaz de atender adecuadamente a todos los perfiles de usuarios. No obstante, el grupo de vehículos de 40 kWh presenta el mayor número de abandonos (326 frente a 200 y 131 en los otros grupos), lo que sugiere una ligera desventaja en la disponibilidad de puntos en momentos de mayor ocupación.

### **7.4.3 Configuración 1×350 kW**

La tercera opción analizada se centra en un único cargador ultrarrápido de 350 kW. A pesar de tener una ocupación media baja (17,92 %), esta configuración presenta el beneficio neto anual más elevado del análisis: 82.771,83 €, con un ROI del 66,22 %. Sin embargo, la rentabilidad viene acompañada de importantes limitaciones operativas.

La tasa de abandono alcanza el 50,90 %, debido a que los vehículos de 40 kWh no pueden utilizar este tipo de cargador, lo que representa automáticamente la pérdida del 50 % de la demanda total. A pesar de atender 7.763 vehículos (21,3 diarios), la mitad restante abandona el servicio. Los tiempos de espera son muy reducidos (1,27 minutos de media), y el tiempo de carga medio es de solo 12,13 minutos, lo que confirma que el cargador responde de forma rápida a la demanda que sí puede atender.

Esta configuración representa un modelo de negocio alternativo, potencialmente válido en electrolinerías especializadas en vehículos de gama alta, que prioricen velocidad de carga y rentabilidad por sesión sobre volumen de clientes. No obstante, no se considera adecuada para una electrolinería generalista, ya que excluye de forma estructural a una parte muy significativa de los usuarios potenciales.

## **7.5 DISCUSIÓN E IMPLICACIONES**

El análisis detallado de las tres configuraciones seleccionadas permite extraer varias conclusiones relevantes tanto desde el punto de vista técnico como estratégico. En primer lugar, se confirma que es posible alcanzar niveles de rentabilidad elevados manteniendo un servicio razonablemente eficiente, siempre que la infraestructura esté dimensionada de forma adecuada en función del perfil de demanda.

La configuración  $1 \times 50 \text{ kW} + 2 \times 100 \text{ kW}$  se consolida como una de las más equilibradas, tanto por su capacidad para atender a todo tipo de vehículos como por su baja tasa de abandono y alto aprovechamiento de los recursos disponibles. Su ocupación elevada en el cargador de menor potencia sugiere que, en caso de crecimiento de la demanda, este podría convertirse en un punto crítico. Aun así, la existencia de dos cargadores de 100 kW aporta suficiente respaldo operativo para absorber la demanda sin saturación.

En el caso de la configuración  $2 \times 100 \text{ kW}$ , se observa que eliminar el cargador de menor potencia reduce la inversión sin comprometer de forma significativa el rendimiento del sistema. La rentabilidad es notablemente superior a la opción anterior, y los niveles de servicio, aunque algo inferiores, se mantienen dentro de márgenes aceptables. Esta alternativa resulta especialmente interesante en escenarios donde se prioriza el retorno económico y donde se espera una proporción significativa de vehículos de capacidad media o alta.

Por otro lado, la configuración con un único cargador de 350 kW representa un enfoque estratégico completamente distinto. Su elevada rentabilidad y cortos tiempos de carga contrastan con una altísima tasa de abandono, derivada de la incompatibilidad con vehículos de menor capacidad. Esto refuerza la idea de que esta solución solo sería viable en contextos específicos, como electrolinerías de uso restringido o premium, orientadas a usuarios con necesidades de carga ultrarrápida y una mayor disposición a pagar por el servicio. En ningún caso puede considerarse una alternativa válida para entornos generalistas.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de encontrar un equilibrio entre eficiencia económica y cobertura de la demanda. La elección de la configuración óptima dependerá en última instancia del contexto en el que se implemente la electrolinera: demanda esperada, perfil de usuarios, limitaciones de espacio y objetivos estratégicos del operador. Los datos obtenidos a través del modelo ofrecen así una base sólida para fundamentar decisiones de diseño que optimicen el uso de la infraestructura y la calidad del servicio ofrecido.

## **7.6 CONCLUSIONES**

El análisis desarrollado en este capítulo ha permitido evaluar el comportamiento de distintas configuraciones de infraestructura bajo un escenario de demanda proyectado para el año 2030, empleando una herramienta de simulación que integra tanto variables técnicas como económicas. A partir de los resultados obtenidos, se ha comprobado que es posible alcanzar niveles de rentabilidad elevados sin comprometer de forma significativa la calidad del servicio, siempre que la distribución de potencias y el número de cargadores se adapten adecuadamente al perfil de la demanda.

Las configuraciones analizadas han puesto de manifiesto la existencia de soluciones equilibradas que permiten atender a los distintos tipos de vehículos con eficiencia operativa. En concreto, la configuración  $1 \times 50 \text{ kW} + 2 \times 100 \text{ kW}$  ha mostrado un comportamiento especialmente sólido, con una rentabilidad razonable y una tasa de abandono mínima, gracias a su versatilidad y capacidad de adaptación a usuarios con diferentes necesidades de carga. La configuración  $2 \times 100 \text{ kW}$  ha demostrado que es posible mejorar la rentabilidad prescindiendo del cargador de menor potencia, sin que ello suponga una penalización significativa en el nivel de servicio. Por su parte, la configuración  $1 \times 350 \text{ kW}$  representa un caso particular con un enfoque claramente segmentado: a pesar de presentar la mayor rentabilidad del análisis, su aplicabilidad se limita a entornos donde se pueda asumir la exclusión de buena parte de la demanda.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten validar el uso del simulador como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el diseño de electrolineras. La

posibilidad de evaluar el impacto de cada configuración sobre indicadores clave como la tasa de abandono, la ocupación de los cargadores o el retorno económico aporta un marco sólido para fundamentar decisiones estratégicas. Además, este tipo de análisis puede adaptarse fácilmente a escenarios futuros con distinta demanda, costes u objetivos operativos, lo que refuerza su utilidad como base para el dimensionamiento de infraestructuras de recarga eficaces y sostenibles.

## Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este Trabajo de Fin de Grado ha permitido desarrollar una herramienta de simulación robusta y flexible para modelar el comportamiento de una electrolinera bajo diferentes configuraciones de cargadores y condiciones de demanda. A través del uso de SimPy en Python y de una interfaz accesible mediante Streamlit, se ha logrado una solución funcional, personalizable y orientada a facilitar la toma de decisiones en el diseño y planificación de estaciones de carga para vehículos eléctricos.

El análisis realizado a partir del caso de estudio ha demostrado que es posible alcanzar niveles de rentabilidad elevados manteniendo niveles aceptables de calidad del servicio. Se han identificado configuraciones óptimas que ofrecen un buen equilibrio entre eficiencia operativa y rendimiento económico, así como otras opciones más especializadas para contextos concretos. El simulador ha resultado especialmente útil para evaluar el impacto de diferentes decisiones sobre la infraestructura, ofreciendo métricas detalladas que ayudan a dimensionar correctamente la electrolinera y a anticipar comportamientos no deseados, como tasas elevadas de abandono o baja ocupación de los cargadores.

No obstante, el modelo actual representa una primera versión del sistema, con importantes posibilidades de evolución y mejora en el futuro. Entre las líneas de desarrollo más relevantes se destacan las siguientes:

- **Acceso completo a datos sin procesar:** sería útil incorporar una opción para exportar directamente todos los datos registrados durante la simulación (tiempos individuales, secuencia de llegada y salida, uso por cargador...), lo que permitiría realizar análisis estadísticos más avanzados y adaptados a las necesidades específicas de cada usuario o empresa.

- **Desarrollo avanzado del módulo económico:** si bien el simulador ya incluye una estimación de ingresos, costes y rentabilidad, existen múltiples costes indirectos aún no contemplados —como licencias, impuestos, mantenimiento correctivo, costes regulatorios o tiempos de inactividad— que podrían incorporarse en futuras versiones para obtener una estimación más realista y completa de la viabilidad económica.
- **Organización horaria de la demanda:** actualmente, la llegada de vehículos se modela con una granularidad diaria y mensual. Una mejora relevante sería implementar una distribución horaria realista de la demanda, especialmente para reflejar la menor afluencia nocturna o los picos en horas punta, ajustando así mejor la simulación a comportamientos reales.
- **Mayor granularidad horaria en precios y demanda:** para incrementar la precisión del modelo, sería recomendable incorporar tanto precios de compra y venta de energía variables por hora como patrones de llegada de vehículos desagregados también por franja horaria. Esto permitiría representar con mayor fidelidad fenómenos como la demanda pico o los incentivos económicos a la recarga en determinadas horas. Sin embargo, en esta primera versión se ha optado por mantener una estructura más sencilla, utilizando valores medios diarios para facilitar la comprensión, uso e implementación inicial del simulador.
- **Incorporación de sistemas de reserva y priorización:** una funcionalidad futura podría ser simular un sistema de reservas o preferencias por parte de ciertos vehículos (como flotas, taxis o clientes premium), permitiendo analizar cómo afectaría al tiempo de espera y al uso de los cargadores, y explorando distintos mecanismos de asignación prioritaria.
- **Modelado del comportamiento del usuario:** sería interesante estudiar cómo los usuarios eligen qué cargador utilizar en función del precio, del tiempo estimado de espera o de la potencia disponible. Esto permitiría representar con mayor fidelidad decisiones reales, incorporando, por ejemplo, un modelo de utilidad o un sistema de elección probabilística. Este enfoque sigue la línea de estudios como los de Yang et al. [21] y

Chattopadhyay y Kar [22], que incorporan lógica de asignación dinámica y decisiones de usuario bajo incertidumbre en estaciones de carga.

- **Validación empírica con datos reales:** para aumentar la fiabilidad del modelo, sería muy valioso realizar un estudio sobre el número real de vehículos que utilizan una electrolinera concreta, en diferentes franjas horarias y días del año. Esto permitiría ajustar las hipótesis iniciales y comprobar la validez de los resultados frente a la operación real de una estación.
- **Análisis de explotación comercial:** por último, sería relevante estudiar cómo podría implementarse esta herramienta como servicio profesional para empresas del sector. Esto incluiría el despliegue en servidores estables, la protección de datos, la posibilidad de integrar pagos o suscripciones, y el soporte técnico necesario para convertir el simulador en un producto comercializable.
- **Consideración del centro de transformación y costes asociados:** una ampliación relevante del modelo económico consistiría en incorporar el impacto del centro de transformación necesario para suministrar la potencia total instalada. Esto implicaría tener en cuenta tanto el coste inicial de infraestructura eléctrica (dependiente de la potencia en kVA) como los costes recurrentes de operación y mantenimiento. Incluir este componente permitiría reflejar con mayor precisión la inversión real requerida en configuraciones de alta potencia, especialmente en electrolineras con cargadores ultrarrápidos.

En definitiva, el trabajo realizado sienta las bases de una herramienta con gran potencial para apoyar la planificación de infraestructuras de recarga, pero abre también un abanico amplio de posibles mejoras y aplicaciones futuras. Su carácter modular y programable permite extender fácilmente sus funcionalidades, adaptándose a las necesidades del sector en constante evolución y contribuyendo a una movilidad eléctrica más eficiente, accesible y estratégica.



## Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Statista, «Electric vehicle charging infrastructure in Spain - Statistics & facts,» 2024.  
[En línea].
- [2] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, «Reglamento (UE) 2023/1804 sobre el despliegue de infraestructura de combustibles alternativos,» Bruselas, 2023.
- [3] International Energy Agency (IEA), «Global EV Outlook 2024 - Trends in Electric Cars,» París, 2024.
- [4] Á. J. P. Triay, «Optimización del modelo de explotación de electrolinerías de alta potencia (Trabajo de Fin de Máster, Universidad Pontificia de Comillas),» 2025.
- [5] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Programa MOVES III – Subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos y la instalación de puntos de recarga,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii>.
- [6] M. Granda, «Esta es la distribución de los puntos de carga para coches eléctricos en España,» *El País*, 2022.
- [7] Policharger, «Tipos de cargadores para vehículos eléctricos,» [En línea]. Available: <https://policharger.com/>.
- [8] Voltbras, «Principales tipos de cargadores para vehículos eléctricos,» [En línea]. Available: <https://voltbras.com/home/>.
- [9] Charging Interface Initiative, «Megawatt Charging System (MCS),» [En línea]. Available: <https://www.charin.global/technology/mcs/>.

- [10] CHAdeMO Association, «Protocol Development,» [En línea].
- [11] ACEA, «Charging ahead: accelerationg the roll-out of EU electric vehicle charging infrastructure,» 2024.
- [12] V2Charge, «Megawatt Charging System (MCS) y carga de vehículos pesados,» [En línea]. Available: <https://v2charge.com/>.
- [13] NHTSA, «Electric Vehicles and Hybrids Safety Guide,» 2025.
- [14] Red eléctrica, «Mapa Reve,» [En línea]. Available: [mapareve.es/mapa-puntos-recarga](http://mapareve.es/mapa-puntos-recarga).
- [15] Rockwell Automation, «Arena Simulation Software,» 2023. [En línea].
- [16] Simpy Developers, «Simoy: Discrete Event Simulation for Python,» 2023. [En línea].
- [17] D. Gross, J. Shortle, J. Thompson y C. Harris, Fundamentals of Queueing Theory, Wiley, 2008.
- [18] D. Gross y C. M. Harris, Fundamentals of Queueing Theory, 2013.
- [19] J.-Y. Liu, S.-F. Liu y D.-Q. Gong, «Electric vehicle charging station layout based on particle swarm simulation,» 2021.
- [20] Femetal, «La simulacion de procesos industriales,» 2009.
- [21] X. Yang, Y. Liu y J. Zhang, «Dynamic Simulation Framework for Real-Time Management of Fast Charging Stations,» 2022.
- [22] S. Chattopadhyay y S. Kar, «User Behavios Modeling in Electric Vehicle Charing Stations During Peak Demand Periods,» 2020.

- [23] Universidad de Oviedo, «Sistema inteligente de recarga de vehículos eléctricos: diseño y operación,» 2023.
- [24] J. García-Villalobos, «Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches,» 2016.
- [25] J. Surendiran, «IoT-Based Advanced Electric Vehicle Charging Infrastructure,» 2022.
- [26] A. Puech, T. Rigaut, W. Templier y M. Tournoud, «Controlling Large Electric Vehicle Charging Stations,» 2024.
- [27] Q-sige, «Sistema inteligente de gestion de esperas,» [En línea]. Available: <https://www.qsige.com/>. [Último acceso: 2025].
- [28] Virta Global, «Fleet Reservation: Maximising efficiency of heavy-duty fleets,» 2024. [En línea].
- [29] A. Chattopadhyay, «IDEAS: Information-Driven EV Admission in,» 2024.
- [30] P. Barman, «Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches,» 2023.
- [31] H. Engel, R. Hensley, S. Knupfer y S. Sahdev, «El impacto potencial de los vehículos eléctricos en los sistemas de energía globales,» Mckinsey, 2018.
- [32] P. Antarasee, A. Siritara y S. Khunkitti, «Optimal Design of Electric Vehicle Fast-Charging Station's Structure Using Metaheuristic Algorithms,» 2023.
- [33] AFIR, «Regulación de infraestructura de combustibles alternativos en la Unión Europea,» 2024.
- [34] Malt, [En línea]. Available: [malt.es](https://malt.es).

- [35] OVHcloud, «Planes VPS: Precios y características.» [En línea].
- [36] Malt, «Tarifas medias de desarrolladores freelance en España.» [En línea]. Available: <https://www.malt.es/t/barometro-tarifas>. [Último acceso: 2025].
- [37] Glassdoor, «Sueldo de Agente de Soporte Técnico en España.» [En línea]. Available: [https://www.glassdoor.es/Sueldos/agente-de-soporte-tecnico-sueldo-SRCH\\_KO0,25.htm](https://www.glassdoor.es/Sueldos/agente-de-soporte-tecnico-sueldo-SRCH_KO0,25.htm). [Último acceso: 2025].
- [38] Statista, «Marketing spend of small businesses in Europe.» [En línea]. Available: <https://www.statista.com/topics/3801/advertising-industry-in-europe/>. [Último acceso: 2025].
- [39] Google Domains, «Precios de dominios y Google Workspace.» [En línea]. Available: <https://workspace.google.com/pricing>. [Último acceso: 2025].
- [40] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), «Mapa de tráfico 2022,» 2022. [En línea]. Available: [mapatrafico.transportes.gob.es/2022/](http://mapatrafico.transportes.gob.es/2022/).
- [41] Idaho National Laboratory, «Plugged In: How Americans Charge Their Electric Vehicles.» 2014.
- [42] Mordor Intelligence, « China EV battery pack market – Growth, trends, and forecasts (2024–2029),» 2024.
- [43] OMIE - Operador del Mercado Ibérico de Energía, «Precios del mercado diario,» 2024.

## **ANEXO I**

### **ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)**

Este proyecto tiene como objetivo ayudar y contribuir con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

#### **ODS 7: Energía asequible y no contaminante**

El proyecto promueve el acceso a sistemas de carga más eficientes y accesibles, fomentando el uso de vehículos eléctricos como alternativa a los medios de transporte basados en combustibles fósiles. Al optimizar la gestión de las estaciones de carga mediante simulación, se mejora el aprovechamiento de la energía disponible, reduciendo tiempos de espera y maximizando la eficiencia energética. De esta forma, se apoya la transición hacia un modelo energético más sostenible, asequible y respetuoso con el medio ambiente.

#### **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura**

El desarrollo de un programa de simulación personalizado para la gestión de estaciones de carga representa una contribución directa a la innovación tecnológica en el ámbito de la movilidad eléctrica. La implementación de herramientas digitales para la planificación y optimización de infraestructuras contribuye al fortalecimiento de una industria más resiliente, moderna y sostenible. Además, el uso de modelos de simulación puede ser clave para el diseño de nuevas soluciones escalables que fomenten la transformación digital del sector.

#### **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles**

Una gestión más eficaz de las estaciones de carga, especialmente en zonas urbanas y periurbanas, contribuye a mejorar la movilidad sostenible. Al anticipar y gestionar mejor la demanda de carga, se reducen las congestiones, se mejora la experiencia del usuario y se fomenta un transporte urbano más ordenado y eficiente. Esto se traduce en ciudades más

habitables, con menor impacto ambiental y una infraestructura de transporte más adaptada a las necesidades de la población.

### **ODS 12: Producción y consumo responsables**

La optimización del uso de la infraestructura de carga permite reducir el desperdicio de recursos energéticos y asegurar un consumo más racional y responsable. El modelo de simulación propuesto facilita la toma de decisiones basada en datos, permitiendo a los operadores de electrolíneas ajustar su funcionamiento para maximizar el rendimiento y minimizar el impacto ambiental. De este modo, se promueve una cultura de eficiencia y responsabilidad tanto en la operación como en el uso de estos sistemas.

En conjunto este proyecto refuerza el compromiso con un modelo de desarrollo sostenible, alineado con los desafíos globales en materia energética, tecnológica y medioambiental.

## ANEXO II

A continuación, se muestran los resultados completos de las tres configuraciones analizadas en detalle:

Un cargador de 50 kW y dos cargadores de 100 kW

<b>Variables</b>	<b>Valores</b>
<b>VE atendidos</b>	15612
<b>VE que abandonan sin servicio</b>	193
<b>Tasa de abandono (%)</b>	1.22
<b>Tiempo promedio en el sistema (min)</b>	66.79
<b>Tiempo máximo en el sistema (min)</b>	377.86
<b>Tiempo promedio en cola de cargadores (min)</b>	22.21
<b>Tiempo máximo en cola de cargadores (min)</b>	226.75
<b>Longitud promedio de la cola</b>	0.68
<b>Longitud máxima de la cola</b>	3
<b>120kWh</b>	3206
<b>70kWh</b>	4733
<b>40kWh</b>	7871
<b>VE atendidos tipo 120kWh</b>	3157
<b>VE atendidos tipo 70kWh</b>	4671
<b>VE atendidos tipo 40kWh</b>	7784
<b>VE que abandonan tipo 120kWh</b>	46
<b>VE que abandonan tipo 70kWh</b>	61
<b>VE que abandonan tipo 40kWh</b>	86
<b>% VE que esperan</b>	57.86
<b>Tiempo medio de carga (min)</b>	45.40
<b>Ocupación media cargadores (%)</b>	44.96
<b>Energía/cargador/hora de media (kWh)</b>	30.31
<b>VE atendidos/día</b>	42.77
<b>Energía total 50kW (MWh)</b>	383.05
<b>Energía total 100kW (MWh)</b>	413.43
<b>Ingresos anuales (€)</b>	269193.07
<b>Costes anuales (€)</b>	216475.33
<b>Beneficio neto anual (€)</b>	52717.74
<b>Rentabilidad sobre inversión(%)</b>	39.05

<b>Energía total VE 120kWh (MWh)</b>	296.28
<b>Energía total VE 70kWh (MWh)</b>	256.97
<b>Energía total VE 40kWh (MWh)</b>	243.24
<b>Energía total Lunes (MWh)</b>	92.30
<b>Energía total Martes (MWh)</b>	101.71
<b>Energía total Miércoles(MWh)</b>	107.56
<b>Energía total Jueves (MWh)</b>	111.61
<b>Energía total Viernes (MWh)</b>	126.93
<b>Energía total Sábado(MWh)</b>	142.74
<b>Energía total Domingo (MWh)</b>	113.63
<b>Energía total Enero (MWh)</b>	54.67
<b>Energía total Febrero (MWh)</b>	59.70
<b>Energía total Marzo (MWh)</b>	59.35
<b>Energía total Abril (MWh)</b>	68.75
<b>Energía total Mayo (MWh)</b>	67.43
<b>Energía total Junio (MWh)</b>	69.31
<b>Energía total Julio (MWh)</b>	78.37
<b>Energía total Agosto (MWh)</b>	75.73
<b>Energía total Septiembre (MWh)</b>	65.86
<b>Energía total Octubre (MWh)</b>	67.38
<b>Energía total Noviembre (MWh)</b>	62.56
<b>Energía total Diciembre (MWh)</b>	67.37
<b>50kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	226.75
<b>50kW - Tiempo medio de carga (min)</b>	60.92
<b>50kW - Ocupación media (%)</b>	87.61
<b>50kW - VE atendidos/día</b>	20.71
<b>100kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	94.79
<b>100kW - Tiempo medio de carga (min)</b>	30.84
<b>100kW - Ocupación media (%)</b>	23.63
<b>100kW - VE atendidos/día</b>	22.07

Dos cargadores de 100 kW

<b>Variables</b>	<b>Valores</b>
<b>VE atendidos</b>	15150
<b>VE que abandonan sin servicio</b>	657
<b>Tasa de abandono (%)</b>	4.16
<b>Tiempo promedio en el sistema (min)</b>	40.45
<b>Tiempo máximo en el sistema (min)</b>	182.62

<b>Tiempo promedio en cola de cargadores (min)</b>	11.51
<b>Tiempo máximo en cola de cargadores (min)</b>	122.83
<b>Longitud promedio de la cola</b>	0.35
<b>Longitud máxima de la cola</b>	2
<b>120kWh</b>	3206
<b>70kWh</b>	4733
<b>40kWh</b>	7871
<b>VE atendidos tipo 120kWh</b>	3074
<b>VE atendidos tipo 70kWh</b>	4532
<b>VE atendidos tipo 40kWh</b>	7544
<b>VE que abandonan tipo 120kWh</b>	131
<b>VE que abandonan tipo 70kWh</b>	200
<b>VE que abandonan tipo 40kWh</b>	326
<b>% VE que esperan</b>	50.31
<b>Tiempo medio de carga (min)</b>	30.70
<b>Ocupación media cargadores (%)</b>	44.25
<b>Energía/cargador/hora de media (kWh)</b>	44.27
<b>VE atendidos/día</b>	41.51
<b>Energía total 100kW (MWh)</b>	775.53
<b>Ingresos anuales (€)</b>	271434.16
<b>Costes anuales (€)</b>	205721.46
<b>Beneficio neto anual (€)</b>	65712.70
<b>Rentabilidad sobre inversión(%)</b>	65.71
<b>Energía total VE 120kWh (MWh)</b>	289.87
<b>Energía total VE 70kWh (MWh)</b>	248.43
<b>Energía total VE 40kWh (MWh)</b>	237.23
<b>Energía total Lunes (MWh)</b>	91.23
<b>Energía total Martes (MWh)</b>	101.44
<b>Energía total Miércoles(MWh)</b>	106.76
<b>Energía total Jueves (MWh)</b>	108.62
<b>Energía total Viernes (MWh)</b>	123.34
<b>Energía total Sábado(MWh)</b>	135.03
<b>Energía total Domingo (MWh)</b>	109.10
<b>Energía total Enero (MWh)</b>	54.70
<b>Energía total Febrero (MWh)</b>	57.84
<b>Energía total Marzo (MWh)</b>	57.72
<b>Energía total Abril (MWh)</b>	66.98
<b>Energía total Mayo (MWh)</b>	66.46
<b>Energía total Junio (MWh)</b>	67.60
<b>Energía total Julio (MWh)</b>	74.02

<b>Energía total Agosto (MWh)</b>	72.84
<b>Energía total Septiembre (MWh)</b>	64.55
<b>Energía total Octubre (MWh)</b>	66.82
<b>Energía total Noviembre (MWh)</b>	60.47
<b>Energía total Diciembre (MWh)</b>	65.53
<b>100kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	122.83
<b>100kW - Tiempo medio de carga (min)</b>	30.70
<b>100kW - Ocupación media (%)</b>	44.25
<b>100kW - VE atendidos/día</b>	41.51

Un cargador de 350 kW

<b>Variables</b>	<b>Valores</b>
<b>VE atendidos</b>	7763
<b>VE que abandonan sin servicio</b>	8046
<b>Tasa de abandono (%)</b>	50.90
<b>Tiempo promedio en el sistema (min)</b>	6.58
<b>Tiempo máximo en el sistema (min)</b>	47.69
<b>Tiempo promedio en cola de cargadores (min)</b>	1.27
<b>Tiempo máximo en cola de cargadores (min)</b>	28.93
<b>Longitud promedio de la cola</b>	0.02
<b>Longitud máxima de la cola</b>	1
<b>120kWh</b>	3206
<b>70kWh</b>	4733
<b>40kWh</b>	7871
<b>VE atendidos tipo 120kWh</b>	3136
<b>VE atendidos tipo 70kWh</b>	4627
<b>VE atendidos tipo 40kWh</b>	0
<b>VE que abandonan tipo 120kWh</b>	69
<b>VE que abandonan tipo 70kWh</b>	106
<b>VE que abandonan tipo 40kWh</b>	7871
<b>% VE que esperan</b>	16.90
<b>Tiempo medio de carga (min)</b>	12.13
<b>Ocupación media cargadores (%)</b>	17.92
<b>Energía/cargador/hora de media (kWh)</b>	62.64
<b>VE atendidos/día</b>	21.27
<b>Energía total 350kW (MWh)</b>	548.73
<b>Ingresos anuales (€)</b>	260645.19

<b>Costes anuales (€)</b>	177873.36
<b>Beneficio neto anual (€)</b>	82771.83
<b>Rentabilidad sobre inversión(%)</b>	66.22
<b>Energía total VE 120kWh (MWh)</b>	294.70
<b>Energía total VE 70kWh (MWh)</b>	254.03
<b>Energía total VE 40kWh (MWh)</b>	0.00
<b>Energía total Lunes (MWh)</b>	64.45
<b>Energía total Martes (MWh)</b>	71.92
<b>Energía total Miércoles(MWh)</b>	73.16
<b>Energía total Jueves (MWh)</b>	76.04
<b>Energía total Viernes (MWh)</b>	86.88
<b>Energía total Sábado(MWh)</b>	101.80
<b>Energía total Domingo (MWh)</b>	74.48
<b>Energía total Enero (MWh)</b>	38.28
<b>Energía total Febrero (MWh)</b>	41.40
<b>Energía total Marzo (MWh)</b>	41.53
<b>Energía total Abril (MWh)</b>	46.50
<b>Energía total Mayo (MWh)</b>	46.24
<b>Energía total Junio (MWh)</b>	47.53
<b>Energía total Julio (MWh)</b>	52.86
<b>Energía total Agosto (MWh)</b>	51.36
<b>Energía total Septiembre (MWh)</b>	47.34
<b>Energía total Octubre (MWh)</b>	48.10
<b>Energía total Noviembre (MWh)</b>	41.11
<b>Energía total Diciembre (MWh)</b>	46.48
<b>350kW - Tiempo máximo en cola (min)</b>	28.93
<b>350kW - Tiempo medio de carga (min)</b>	12.13
<b>350kW - Ocupación media (%)</b>	17.92
<b>350kW - VE atendidos/día</b>	21.27

## **ANEXO III**

Este anexo tiene como objetivo proporcionar una guía clara y detallada para el uso del modelo de simulación descrito en este proyecto. La guía se estructura en secciones que explican cómo cargar los archivos de entrada necesarios (como la configuración de cargadores, tipos de vehículos eléctricos, parámetros de simulación y datos económicos), así como las opciones para utilizar datos de ejemplo. Además, se describen los pasos para ejecutar la simulación y se detallan las métricas generadas.

# Guía del Usuario - Simulador de Electrolinera

Bienvenido/a al Simulador de Electrolinera, una herramienta interactiva desarrollada en Streamlit para analizar el funcionamiento y la rentabilidad de una electrolinera en distintas condiciones.

Este simulador permite cargar archivos CSV con tus propias configuraciones o usar ejemplos por defecto. Al ejecutar la simulación, se generan métricas clave como: número de coches atendidos, tiempos de espera, ocupación de cargadores y beneficios económicos.

## ¿Cómo usar la aplicación?

### Accede a la app

Abre el simulador desde la URL: [Streamlit](#)

## Secciones y Datos de Entrada

Cada sección permite subir un archivo CSV. Si no tienes uno, puedes usar los datos de ejemplo haciendo clic en "Usar configuración de ejemplo".

### 1- Configuración de Cargadores

Sube un archivo llamado `configuracion_cargadores.csv` con estas columnas:

tipo_cargador	potencia_kW	cantidad	limiteCola	precio_venta_euros/kWh
100kW	100	2	2	0.45
350kW	350	1	1	0.55

- **potencia\_kW:** Capacidad de carga del cargador.
- **cantidad:** Cuántos cargadores de ese tipo hay.
- **limiteCola:** Máxima cola permitida (opcional).
- **precio\_venta\_euros/kWh:** Precio de venta del kWh a los clientes.

## 2- Tipos de VE

Archivo: tipos\_VE.csv

tipo_VE	probabilidad	bateria_media	bateria_desviacion
120kWh	0.2	0.8	0.2

- **tipo\_VE:** Capacidad máxima del coche (en kWh).
- **probabilidad:** Frecuencia con la que aparece cada tipo.
- **bateria\_media:** % medio de batería a cargar.
- **bateria\_desviacion:** Variabilidad del % de carga.

## 3- Parámetros de Simulación

Archivo: parametros\_simulacion.csv

tiempo_simulacion_min	numero_replicaciones	fecha_inicio_simulacion
525600	1	2030-01-01

- Simulación por defecto: 1 año (525600 min).
- Número de veces que se repite la simulación para obtener promedios.
- Fecha de inicio.

## 4- Tiempos de Llegada

Archivo: tiempo\_entre\_llegadas.csv

(Semanas en filas, meses en columnas)

	Enero	Febrero	...
Lunes	38.91	33.60	...
Martes	38.89	37.44	...

Valores en minutos entre dos coches consecutivos. Cada celda representa el tiempo medio de llegada un día concreto de un mes.

## 5- Supuestos Económicos

Archivo: parametros\_economicos.csv

variable	valor
coste_mantenimiento_pct	0.07
vida_util_cargador_anos	15
coste_explotacion_anual_euros	50000
inversion_fija_por_cargador_euros	20000
inversion_variable_cargador_euros/kW	300
precio_potencia_anual_euros_kW	50

Se usa para calcular costes, amortización e ingresos esperados.

## 6- Precio de compra por día y mes

Archivo: precio\_compra\_por\_dia\_y\_mes.csv

(Filas = días de la semana, columnas = meses)

	Enero	Febrero	...
Lunes	0.145	0.158	...
Martes	0.144	0.161	...

Precio del kWh para la electrolinera (lo que paga por comprar electricidad).

## Ejecutar la Simulación

Cuando hayas subido todos los archivos o usado los ejemplos, haz clic en "Ejecutar Simulación".

El sistema realizará el análisis y mostrará dos bloques de resultados:

- **Resultados por réplica:** una fila por ejecución.
- **Resumen global:** promedio de todas las métricas.

También podrás descargar los resultados en CSV.

## Métricas que se calculan

### Operativas

- Coches atendidos y coches que abandonan.
- Tiempos de espera y de carga.
- Longitud de cola y uso medio de cargadores.

## **Económicas**

- Ingresos por venta de energía.
- Costes (compra de energía, mantenimiento, amortización...).
- Beneficio neto anual.
- Rentabilidad sobre inversión.

## **Energía**

- Energía total entregada por tipo de coche, día de la semana y mes.
- Energía por tipo de cargador.

¡Esperamos que esta guía te sea de ayuda para sacar el máximo provecho del Simulador de Electrolinera!