



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO:
**ESTUDIO DE LA DESCARBONIZACIÓN
DE LAS FLOTAS DE ÚLTIMA MILLA EN
LA CIUDAD DE MADRID**

Autor y correo:

Jesús Rodrigo Olmos 202114747@alu.comillas.edu

Director y correo:

Pablo Frías Marín Pablo.Frias@iit.comillas.edu

Madrid, martes 14 de julio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Estudio de la descarbonización de las flotas de última milla en la ciudad de Madrid** e la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **de Ingeniería de Tecnologías Industriales** es de mi autoría 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.

Uso de Inteligencia Artificial¹

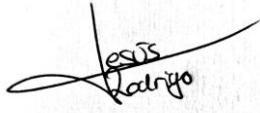
Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☒ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☐ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, la Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

--


Firmado (alumno): Jesús Rodrigo Olmos
Fecha: 14/07/2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: PABLO FRIAS MARIN	Fdo:
Fecha: 15/07/2026	Fecha:



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO:
**ESTUDIO DE LA DESCARBONIZACIÓN
DE LAS FLOTAS DE ÚLTIMA MILLA EN
LA CIUDAD DE MADRID**

Autor y correo:

Jesús Rodrigo Olmos 202114747@alu.comillas.edu

Director y correo:

Pablo Frías Marín Pablo.Frias@iit.comillas.edu

Madrid, martes 14 de julio de 2026

ESTUDIO DE LA DESCARBONIZACIÓN DE LAS FLOTAS DE ÚLTIMA MILLA EN LA CIUDAD DE MADRID

Autor: Rodrigo Olmos, Jesús.

Director: Frías Marín, Pablo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El transporte es el único sector cuyas emisiones han aumentado respecto a los niveles de 1990 en el conjunto de la Unión Europea, frente a la reducción lograda por el resto de la economía [1]. Dentro de él, la última milla, el eslabón final de la cadena de suministro, en el que la mercancía se fragmenta y alcanza su destino, concentra una responsabilidad desproporcionada: opera con vehículos de baja ocupación, en trayectos cortos, con paradas constantes y en el entorno urbano más congestionado. El auge sostenido del comercio electrónico ha multiplicado la presión sobre este eslabón.

Madrid no es ajena a esta situación. La ciudad cuenta ya con instrumentos orientados a corregirla, como la estrategia Madrid 360 y la progresiva restricción de acceso a los vehículos más contaminantes mediante Zonas de Bajas Emisiones. Los operadores logísticos se enfrentan, en consecuencia, a una transición inevitable, pero carecen de estudios que cuantifiquen qué consigue realmente cada estrategia, qué infraestructura exige y cuánto cuesta.

1.2. Estado de la técnica

La revisión del estado de la técnica revela que la descarbonización de la última milla no es un problema pendiente de invención tecnológica. La electrificación es la tecnología más madura y cuenta con casos validados en operación real, como los de Londres, impulsado por la presión regulatoria de su Ultra Low Emission Zone [2], y Berlín, donde la alianza entre IKEA y Rhenus ha logrado que más del 95 % de las entregas a domicilio en el área metropolitana sean libres de emisiones [3]. La reorganización logística mediante microhubs y centros de consolidación también está ensayada, con referentes como el microhub del aparcamiento de la Plaza Mayor de Madrid, en el marco del proyecto LEAD [4], o el proyecto Stadsleveransen de Gotemburgo [5].

Lo que el conocimiento disponible no ofrece es una respuesta integrada. Cada palanca se ha estudiado por separado: los casos de electrificación reportan reducciones de emisiones pero no cuantifican la demanda energética que generan ni la infraestructura que exigen; los proyectos de microhub describen su operativa pero rara vez miden el coste que introduce la desconsolidación; los análisis de coste comparan vehículos aislados al margen de la estrategia de flota. A ello se añade la ausencia de anclaje temporal (los estudios comparan

escenarios estáticos sin modelar la trayectoria que conduce de uno a otro) y la falta de particularización a Madrid, cuya estructura de flota, fuertemente fragmentada, y cuyo canal HORECA de gran volumen no encuentran equivalente en los casos revisados.

1.3. Objeto del proyecto

El presente trabajo evalúa la viabilidad técnica, económica e impacto medioambiental de la descarbonización de la flota de última milla de Madrid. Para ello se articula en siete objetivos: caracterizar el parque de última milla de partida, desarrollar un modelo de simulación de su evolución, definir y simular sobre él tres escenarios de descarbonización, cuantificar la demanda de energía eléctrica asociada, dimensionar la infraestructura de recarga necesaria, diseñar y dimensionar un microhub de referencia y evaluar la viabilidad económica de la transición mediante un análisis de coste total de propiedad.

2. METODOLOGÍA

2.1. Caracterización de la flota

El punto de partida es la construcción de una flota de referencia de la última milla madrileña. Ante la ausencia de un censo público que desglose los flujos de la distribución urbana, la flota se compone a partir de las cuotas de mercado de los operadores, los datos corporativos de electrificación y las fuentes sectoriales disponibles, distinguiendo dos grandes bloques: el reparto de paquetería a particulares (B2C), al que se asigna un 35 % del volumen, y la distribución comercial y empresarial (B2B, incluido el canal HORECA), con el 65 % restante [6].

El resultado es una flota de referencia compuesta por once tipos de vehículo, en la que los vehículos diésel representan el 86,6 % del parque y el furgón de gran volumen L2H2 constituye, por sí solo, en torno al 62 % del total.

A esta composición se añade una dimensión determinante: la antigüedad. El parque presenta una estructura marcadamente bimodal, con un perfil corporativo joven, que renueva en ciclos cortos, y un perfil envejecido correspondiente a los transportistas autónomos y subcontratas, cuya edad media alcanza los 14,4 años [7]. Cada vehículo se caracteriza, finalmente, por su consumo, su capacidad de batería y autonomía en el caso de los eléctricos, y sus factores de emisión de CO₂, NO_x y partículas, estos dos últimos dependientes de la norma Euro con la que se homologó, tomados del inventario EMEP/EEA [8].

2.2. Modelo de simulación

Sobre esta flota se desarrolla un modelo de simulación en MATLAB que proyecta su evolución año a año desde 2026 hasta 2050. El modelo representa la flota mediante una matriz de cohortes, en la que cada elemento indica el número de vehículos de un tipo y una edad determinados, con resolución anual. En cada paso, la flota envejece un año, los vehículos que alcanzan la edad de jubilación se retiran, y son reemplazados por unidades nuevas cuyo tipo y tecnología dependen de la estrategia simulada, manteniéndose constante el tamaño total del parque.

Un aspecto determinante es el tratamiento de la norma Euro, que queda congelada al año de matriculación: un vehículo conserva su norma durante toda su vida útil y no empeora sus

emisiones al envejecer. En consecuencia, lo que modifica las emisiones a lo largo del tiempo no es el envejecimiento, sino exclusivamente la renovación.

Sobre esta dinámica se definen tres escenarios, correspondientes a las tres palancas de la transición:

- **Escenario A — Velocidad de renovación:** se varía la edad de retirada, sustituyendo cada vehículo por otro del mismo tipo y tecnología, para aislar el efecto de acelerar la renovación manteniendo el diésel.
- **Escenario B — Tecnología de renovación:** los vehículos retirados se sustituyen por sus equivalentes eléctricos, en dos variantes (electrificación total y parcial). Los vehículos frigoríficos se consideran no electrificables, dada la limitación que el consumo del equipo de frío impone sobre la autonomía.
- **Escenario C — Composición del parque:** los vehículos de gran capacidad que operan en el centro se descomponen en combinaciones equivalentes en volumen de vehículos pequeños eléctricos, reproduciendo la lógica del microhub y capturando la penalización por desconsolidación.

2.3. Dimensionamiento de la infraestructura y análisis económico

A partir de la demanda energética obtenida en el escenario B se dimensiona la infraestructura de recarga, bajo la hipótesis de recarga nocturna en horas valle (0:00-7:00 h). Para cada tipo de vehículo se calcula la energía diaria a reponer, la potencia mínima del cargador y el escalón comercial normalizado que le corresponde, agregando después el resultado al conjunto de la flota.

El microhub se dimensiona sobre un emplazamiento de referencia (un aparcamiento subterráneo del Distrito Centro) a partir de una cuota de servicio fijada por la capacidad física del emplazamiento. La restricción de gálibo del subterráneo obliga a una arquitectura en dos niveles, con descarga del vehículo consolidado en superficie.

Finalmente, el análisis de coste total de propiedad (TCO) compara, a lo largo de ocho años, el furgón L2H2 diésel con su equivalente eléctrico, agregando el coste de adquisición, el punto de recarga, la energía y el mantenimiento, para determinar el punto de retorno de la inversión. Este análisis incluye también vehículos de renting.

3. RESULTADOS

Tabla 1: Síntesis de los resultados de los tres escenarios de descarbonización (horizonte 2050) – Fuente: elaboración propia

Escenario	CO ₂ (t/año)	NO _x (kg/año)	PM (kg/año)	Energía (MWh/año)
Situación de partida (2026)	58.000	89.200	1.430	7.000
A – Renovación a diésel	58.000	30.500	97	7.000
B – Electrificación total	10.000	4.500	19	70.000
C – Microhub	34.300	-	-	59.800

3.1. Escenario A: renovar no descarboniza

Acelerar la renovación de la flota manteniendo la tecnología diésel reduce las emisiones de NO_x en un 66 % (de unos 89.200 a 30.500 kg/año) y las de partículas en un 93 % (de unos 1.430 a 97 kg/año), gracias a la severidad creciente de las normas Euro y a la generalización del filtro de partículas. Sin embargo, las emisiones de CO₂ permanecen absolutamente invariables, en torno a las 58.000 t/año, con independencia de la velocidad de renovación: el CO₂ depende únicamente del combustible consumido, y un furgón diésel nuevo consume lo mismo que uno antiguo.

Además, aun en los contaminantes que sí reduce, la renovación tropieza con un suelo infranqueable: por rápido que se renueve el parque, el NO_x no puede descender por debajo del nivel que corresponde a una flota diésel íntegramente renovada a la norma más limpia disponible.

3.2. Escenario B: la electrificación y su residuo

Solo el cambio tecnológico consigue atacar el CO₂. La electrificación total reduce las emisiones de dióxido de carbono desde las 58.000 hasta unas 10.000 t/año (–83 %) y rompe el suelo de NO_x del parque diésel, llevándolo hasta unos 4.500 kg/año (–95 %).

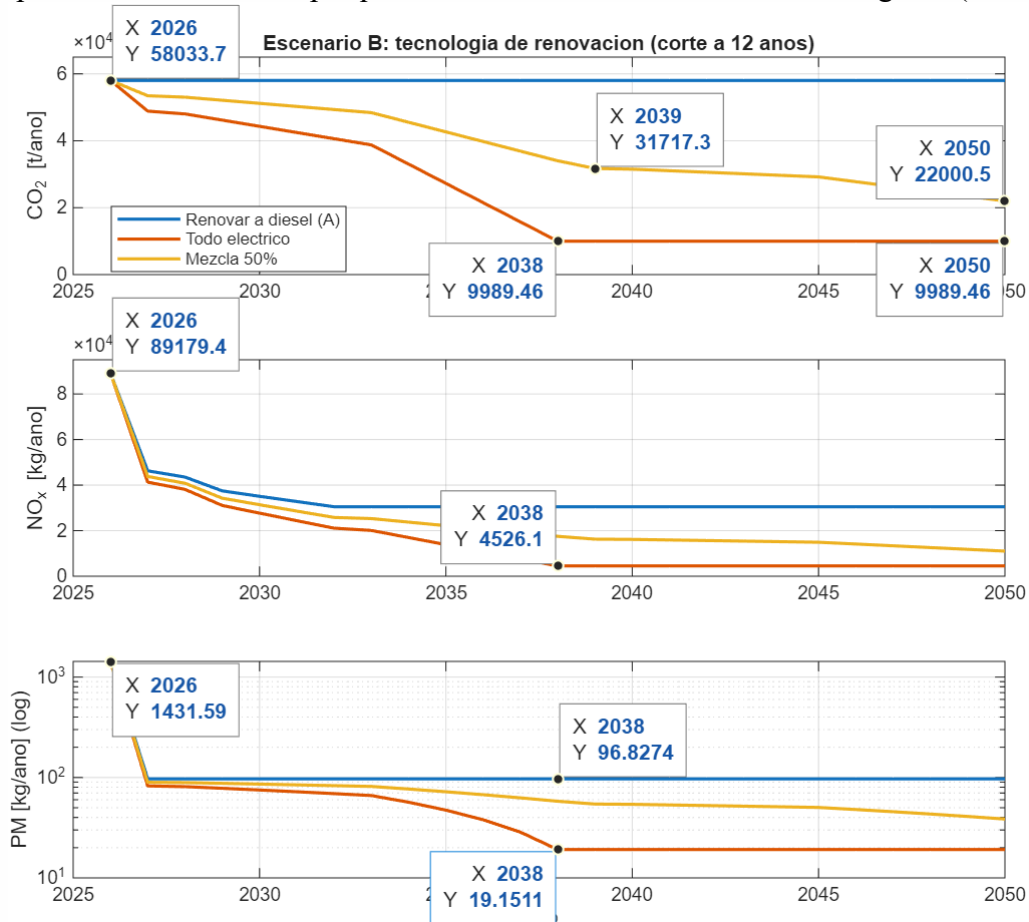


Figura 1: Evolución de las emisiones de CO₂, NO_x y partículas en el escenario B, según la tecnología de renovación – Fuente: elaboración propia

Ese valor residual de 10.000 t/año encierra una de las conclusiones más relevantes del estudio: la electrificación no elimina por completo las emisiones. El residuo corresponde a los vehículos frigoríficos, que la tecnología actual no permite electrificar, lo que revela la cadena de frío como el eslabón más resistente de la descarbonización.

La contrapartida es un incremento de la demanda eléctrica que multiplica por diez el consumo de partida, hasta unos 70.000 MWh/año.

3.3. Infraestructura de recarga

El dimensionamiento demuestra que ese incremento de demanda es más manejable de lo previsible. Con un recorrido de 90 km diarios, los vehículos consumen apenas entre un 36% y un 41 % de su batería, de modo que no necesitan una recarga completa cada noche, sino solo reponer la energía del día, y disponen para ello de siete horas de ventana valle. El resultado es que la recarga lenta es la más conveniente: prácticamente toda la flota se repone

con cargadores en corriente alterna de 7,4 y 11 kW, sin necesidad de recarga rápida en corriente continua.

La potencia agregada resulta de dividir la energía diaria (unos 280 MWh) entre las siete horas de la ventana, arrojando un suelo físico del orden de 40 MW. Al escalonar las conexiones y repartirse territorialmente, la potencia por emplazamiento desciende a valores de acometida ordinaria: el microhub de referencia requiere apenas 190 kW. Al concentrarse en horas valle, además, la carga rellena el valle nocturno de la curva de demanda en lugar de agravar sus picos.

3.4. Microhub

El microhub de referencia gestiona 212,5 m³/día, aportados por 15 furgones L2H2 y 2 camiones rígidos que descargan en superficie. Aplicando las combinaciones de equivalencia por volumen, esos diecisiete vehículos pesados se transforman en 65 vehículos capilares eléctricos (46 furgonetas L1H1 y 19 de micro distribución), un multiplicador de ×3,8. La instalación requiere unos 1.250 m², compatibles con una planta de aparcamiento, y 65 puntos de recarga.

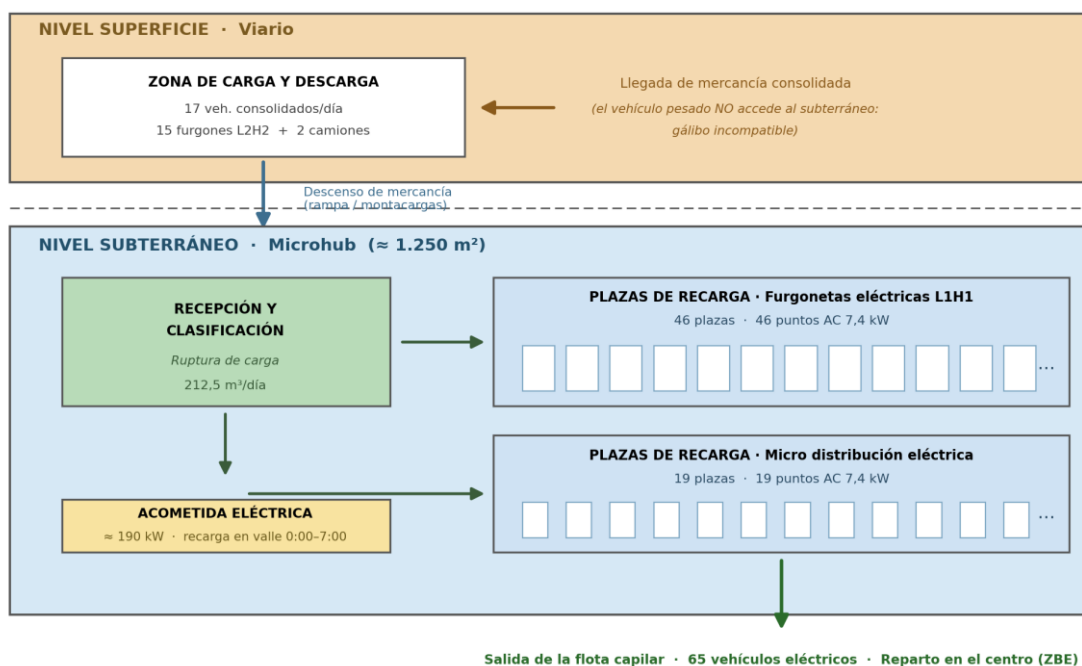


Figura 2: Esquema de implantación del microhub de referencia – Fuente: elaboración propia

Este resultado cuantifica físicamente la penalización por desconsolidación: el microhub elimina las emisiones del centro a costa de multiplicar por casi cuatro el número de vehículos en circulación, con el consiguiente incremento de kilómetros y de ocupación del viario, y exige además una red numerosa de instalaciones.

3.5. Análisis económico

El ahorro operativo del vehículo eléctrico es sólido y estructural: su coste energético es cinco veces inferior al del diésel (693 € frente a 3.517 € anuales), lo que unido al menor mantenimiento supone un ahorro cercano a 3.324 € por vehículo y año.

El punto de retorno, en cambio, depende críticamente del precio de adquisición: 7,2 años a precio de catálogo frente a 3,4 años a precios accesibles a una flota profesional. Una diferencia en el precio de compra desplaza el retorno casi cuatro años, mientras que variaciones razonables en el coste de la energía o del mantenimiento apenas lo mueven.

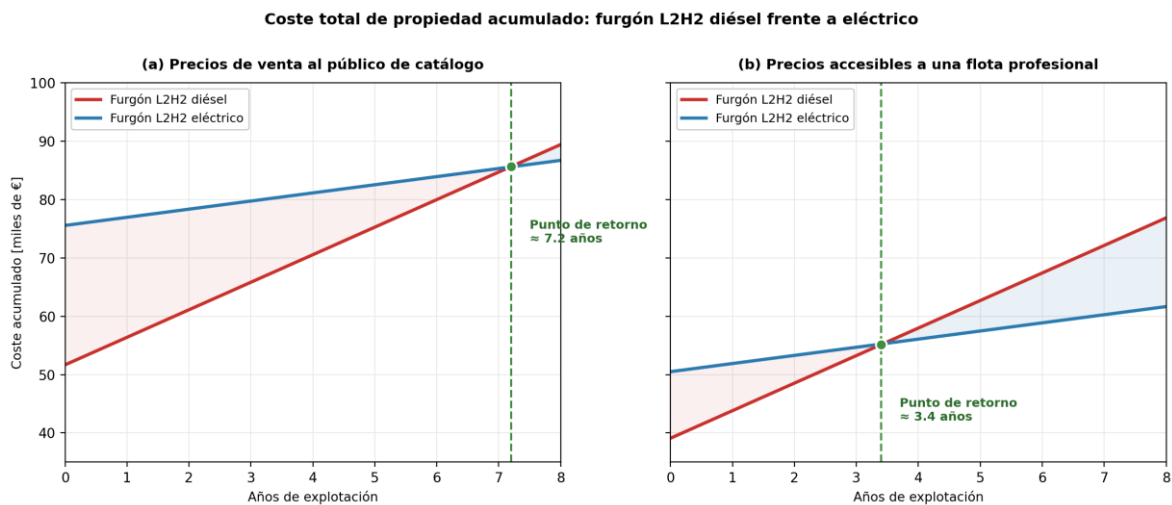


Figura 3: Coste total de propiedad acumulado del furgón L2H2, diésel frente a eléctrico, según el precio de adquisición – Fuente: elaboración propia

4. CONCLUSIONES

El estudio permite extraer seis conclusiones principales.

Primera, renovar la flota no descarboniza: es una política de calidad del aire, no de mitigación climática, y su capacidad de reducción está además acotada por un suelo que la tecnología diésel no puede superar.

Segunda, la electrificación es la única palanca capaz de reducir el CO₂, aunque no llega a eliminarlo por completo: los vehículos frigoríficos, cuyo equipo de frío consume energía de forma continua y compromete la autonomía, no son electrificables con la tecnología actual y mantienen un nivel de emisiones que ninguna estrategia consigue suprimir.

Tercera, el reto se desplaza del vehículo a la red, aunque de forma más manejable de lo previsible: la recarga de la última milla es lenta, nocturna y predecible, se resuelve con cargadores de potencia moderada y, al concentrarse en horas valle, resulta favorable para el sistema eléctrico.

Cuarta, el microhub transforma el problema, no lo elimina: debe concebirse como una medida selectiva, aplicable a los ámbitos de mayor restricción, y no como solución generalizable.

Quinta, la viabilidad económica no se juega en la operación, sino en la compra: el ahorro operativo es incuestionable, pero es el precio de adquisición el que decide si la inversión se recupera.

Sexta, la barrera es estructural, no tecnológica. El gran operador, que compra por volumen, ya se encuentra en el escenario económicamente favorable; el transportista autónomo, que compra a precio de catálogo y financia en solitario su punto de recarga, afronta un horizonte de siete años que su margen no le permite soportar. No es que el vehículo eléctrico no sea rentable: es que su rentabilidad llega demasiado tarde para quien no puede esperar.

De ello se deriva la recomendación principal a la administración: la palanca pública más eficaz es la ayuda a la adquisición, principalmente al autónomo, focalizada en el segmento con barrera efectiva, pues actúa sobre el único término que decide el resultado.

Conviene señalar, por último, que el modelo trabaja con una flota representativa de tamaño ajustable y no con el censo real de Madrid, ya que sus datos no están disponibles. Las magnitudes absolutas escalan, por tanto, con ese tamaño, mientras que los resultados relativos (porcentajes de reducción, punto de retorno, multiplicador del microhub) son independientes de él. El trabajo presenta, más que cifras cerradas, una metodología replicable a otras flotas y a otras ciudades mediante la sustitución de sus datos de entrada.

5. REFERENCIAS

[1] European Environment Agency, «Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport», jun. 2022. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/transport-and-environment-report2021>

[2] Transport for London, «Freight and servicing action plan», Mayor of London, 2019. Disponible en: <https://content.tfl.gov.uk/freight-servicing-action-plan.pdf>

[3] Rhenus Group, «Rhenus Home Delivery's electric fleet has grown to 300 vehicles», sep. 2024. Disponible en: <https://www.rhenus.group/>

[4] EMT Madrid, «Un "microhub" logístico en el parking de Plaza Mayor para impulsar el reparto de bajas emisiones», oct. 2021. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/>

[5] City of Gothenburg, «Stadsleveransen: A success story», CIVITAS / Urban Transport Administration, sep. 2016. Disponible en: <https://civitas.eu/>

[6] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), «Informe Anual del Sector Postal», Madrid, jul. 2025. Disponible en: <https://www.cnmc.es/sites/default/files/6089770.pdf>

[7] Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), «Envejecimiento del parque», feb. 2024. Disponible en: <https://anfac.com/>

[8] European Environment Agency (EEA), «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 — 1.A.3.b.i-iv Road transport (exhaust emissions)», 2023. Disponible en: <https://copert.emisia.com/>

STUDY OF THE DECARBONISATION OF LAST-MILE FLEETS IN THE CITY OF MADRID

Author: Rodrigo Olmos, Jesús.

Director: Frías Marín, Pablo.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

PROJECT SUMMARY

1. INTRODUCTION

1.1. Problem statement

Transport is the only sector whose emissions have increased relative to 1990 levels across the European Union, in contrast to the reduction achieved by the rest of the economy [1]. Within it, the last mile, the final link of the supply chain, where goods are broken down and reach their destination, bears a disproportionate share of responsibility: it operates with low-occupancy vehicles, over short journeys, with constant stops and in the most congested urban environment. The sustained growth of e-commerce has multiplied the pressure on this link.

Madrid is no exception. The city already has instruments in place to address this situation, such as the Madrid 360 strategy and the progressive restriction of access for the most polluting vehicles through Low Emission Zones. Logistics operators therefore face an unavoidable transition, yet they lack studies quantifying what each strategy actually achieves, what infrastructure it requires and how much it costs.

1.2. State of the art

The review of the state of the art reveals that decarbonising the last mile is not a problem awaiting technological invention. Electrification is the most mature technology and has been validated in real operation, as shown by London, driven by the regulatory pressure of its Ultra Low Emission Zone [2], and Berlin, where the partnership between IKEA and Rhenus has achieved that over 95 % of home deliveries in the metropolitan area are emission-free [3]. Logistics reorganisation through microhubs and consolidation centres has also been tested, with references such as the microhub in the Plaza Mayor car park in Madrid, developed within the LEAD project [4], or the Stadsleveransen project in Gothenburg [5].

What the available knowledge does not offer is an integrated answer. Each lever has been studied separately: electrification case studies report emission reductions but do not quantify the energy demand they generate nor the infrastructure they require; microhub projects describe their operation but rarely measure the cost introduced by deconsolidation; cost analyses compare isolated vehicles, detached from the fleet strategy in which they operate. To this must be added the lack of temporal anchoring, studies compare static scenarios without modelling the trajectory leading from one to another, and the absence of particularisation to Madrid, whose heavily fragmented fleet structure and high-volume HORECA channel find no equivalent among the cases reviewed.

1.3. Purpose of the project

This work assesses the technical, economic and environmental feasibility of decarbonising Madrid's last-mile fleet. To this end it is structured around seven objectives: characterising the initial last-mile fleet, developing a simulation model of its evolution, defining and simulating three decarbonisation scenarios, quantifying the associated electricity demand, sizing the required charging infrastructure, designing and dimensioning a reference microhub, and assessing the economic feasibility of the transition through a total cost of ownership analysis.

2. METHODOLOGY

2.1. Fleet characterisation

The starting point is the construction of a reference fleet for Madrid's last mile. In the absence of a public census breaking down urban freight distribution flows, the fleet is composed from operators' market shares, corporate electrification data and the available sector sources, distinguishing two major blocks: parcel delivery to individuals (B2C), assigned 35 % of the volume, and commercial and business distribution (B2B, including the HORECA channel), accounting for the remaining 65 % [6].

The result is a reference fleet comprising eleven vehicle types, in which diesel vehicles represent 86.6 % of the parc and the large-volume L2H2 van alone accounts for around 62 % of the total.

A decisive further dimension is added to this composition: age. The parc displays a markedly bimodal structure, with a young corporate profile that renews on short cycles, and an aged profile corresponding to self-employed hauliers and subcontractors, whose average age reaches 14.4 years [7]. Each vehicle is finally characterised by its consumption, its battery capacity and range in the case of electric vehicles, and its emission factors for CO₂, NO_x and particulate matter, the latter two depending on the Euro standard under which it was type-approved, taken from the EMEP/EEA inventory [8].

2.2. Simulation model

A simulation model developed in MATLAB projects the evolution of this fleet year by year from 2026 to 2050. The model represents the fleet through a cohort matrix, in which each element indicates the number of vehicles of a given type and age, with annual resolution. At each step, the fleet ages by one year, vehicles reaching the retirement age are withdrawn, and are replaced by new units whose type and technology depend on the strategy being simulated, keeping the total size of the parc constant.

A decisive aspect is the treatment of the Euro standard, which is frozen at the year of registration: a vehicle retains its standard throughout its service life and does not worsen its emissions as it ages. Consequently, what alters emissions over time is not ageing, but renewal alone.

Three scenarios are defined on this dynamic, corresponding to the three levers of the transition:

Scenario A — Renewal speed: the retirement age is varied, replacing each vehicle with another of the same type and technology, in order to isolate the effect of accelerating renewal while retaining diesel.

Scenario B — Renewal technology: withdrawn vehicles are replaced by their electric equivalents, in two variants (full and partial electrification). Refrigerated vehicles are considered non-electrifiable, given the constraint that the cooling unit's consumption imposes on range.

Scenario C — Fleet composition: large-capacity vehicles operating in the city centre are broken down into volume-equivalent combinations of small electric vehicles, reproducing the microhub logic and capturing the deconsolidation penalty.

2.3. Infrastructure sizing and economic analysis

The charging infrastructure is sized from the energy demand obtained in Scenario B, under the assumption of overnight charging during off-peak hours (00:00–07:00). For each vehicle type, the daily energy to be replenished, the minimum charger power and the corresponding standardised commercial rating are calculated, and the result is subsequently aggregated across the fleet.

The microhub is sized on a reference site (an underground car park in the Central District) based on a service quota set by the physical capacity of the site. The height clearance constraint of the underground level requires a two-tier architecture, with the consolidated vehicle unloading at street level.

Finally, the total cost of ownership (TCO) analysis compares, over eight years, the diesel L2H2 van with its electric equivalent, aggregating the purchase cost, the charging point, energy and maintenance, in order to determine the payback period of the investment.

3. RESULTS

Table 1: Summary of results for the three decarbonisation scenarios (2050 horizon) – Source: own elaboration

Scenario	CO ₂ (t/year)	NO _x (kg/year)	PM (kg/year)	Energía (MWh/year)
Baseline (2026)	58.000	89.200	1.430	7.000
A – Diesel renewal	58.000	30.500	97	7.000
B – Full electrification	10.000	4.500	19	70.000
C – Microhub	34.300	-	-	59.800

3.1. Scenario A: renewal does not decarbonise

Accelerating fleet renewal while retaining diesel technology reduces NO_x emissions by 66 % (from around 89,200 to 30,500 kg/year), thanks to the increasing stringency of Euro standards and the widespread adoption of the particulate filter. However, CO₂ emissions remain entirely unchanged, at around 58,000 t/year, regardless of the renewal speed: CO₂ depends solely on the fuel consumed, and a new diesel van consumes the same as an old one.

Moreover, even for the pollutants it does reduce, renewal encounters an insurmountable floor: however fast the parc is renewed, NO_x cannot fall below the level corresponding to a diesel fleet fully renewed to the cleanest available standard.

3.2. Scenario B: electrification and its residue

Only technological change succeeds in tackling CO₂. Full electrification reduces carbon dioxide emissions from 58,000 to around 10,000 t/year (–83 %) and breaks the NO_x floor of the diesel parc, bringing it down to around 4,500 kg/year (–95 %).

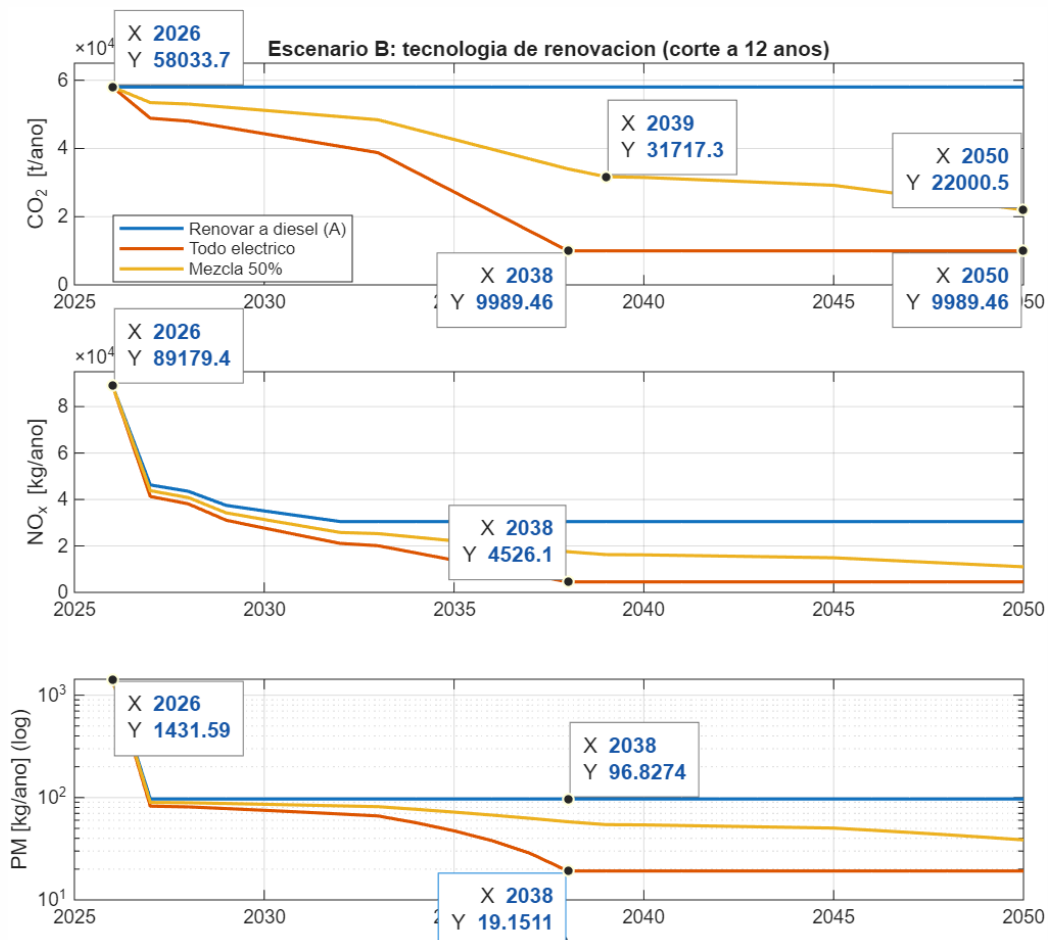


Figure 1: Evolution of CO₂, NO_x and particulate matter emissions under Scenario B, by renewal technology – Source: own elaboration

That residual value of 10,000 t/year contains one of the study's most relevant conclusions: electrification does not entirely eliminate emissions. The residue corresponds to refrigerated vehicles, which current technology does not allow to be electrified, revealing the cold chain as the most resistant link in decarbonisation.

The trade-off is an increase in electricity demand that multiplies the initial consumption tenfold, up to around 70,000 MWh/year.

3.3. Charging infrastructure

The sizing exercise demonstrates that this increase in demand is more manageable than might be expected. With a daily range of 90 km, vehicles consume only between 36 % and 41 % of their battery, meaning they do not require a full charge each night but only need to replenish the day's energy, and they have a seven-hour off-peak window in which to do so. As a result, charging is slow: virtually the entire fleet is replenished with alternating-current chargers of 7.4 and 11 kW, with no need for direct-current fast charging.

The aggregate power results from dividing the daily energy (around 280 MWh) by the seven hours of the window, yielding a physical floor of around 40 MW. By staggering connections and distributing them territorially, the power per site falls to ordinary connection values: the reference microhub requires only 190 kW. By concentrating in off-peak hours, moreover, the load fills the overnight valley of the demand curve rather than aggravating its peaks.

3.4. Microhub

The reference microhub handles 212.5 m³/day, supplied by 15 L2H2 vans and 2 rigid trucks unloading at street level. Applying the volume-equivalence combinations, those seventeen heavy vehicles are transformed into 65 electric capillary vehicles (46 L1H1 vans and 19 micro-distribution units), a multiplier of ×3.8. The facility requires around 1,160 m², compatible with a single car park level, and 65 charging points.

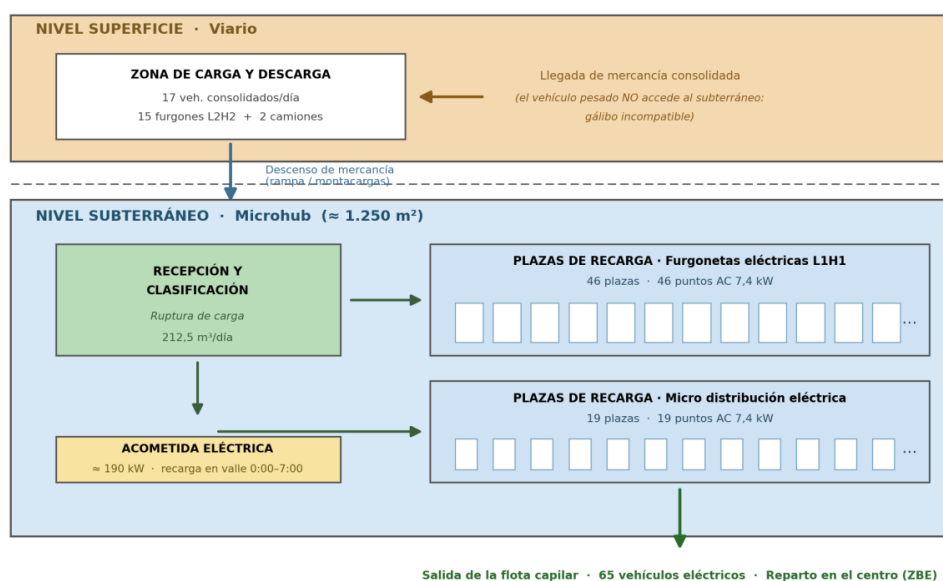


Figure 2: Layout of the reference microhub – Source: own elaboration

This result physically quantifies the deconsolidation penalty: the microhub eliminates emissions in the city centre at the cost of multiplying the number of vehicles in circulation almost fourfold, with the consequent increase in kilometres travelled and road occupancy, and it further requires a numerous network of facilities.

3.5. Economic analysis

The operating saving of the electric vehicle is solid and structural: its energy cost is five times lower than that of diesel (€693 against €3,517 per year) which, together with lower maintenance, amounts to a saving of around €3,324 per vehicle and year.

The payback period, by contrast, depends critically on the purchase price: 7.2 years at list price against 3.4 years at prices accessible to a professional fleet. A difference in the purchase price shifts the payback by almost four years, whereas reasonable variations in energy or maintenance costs barely move it.

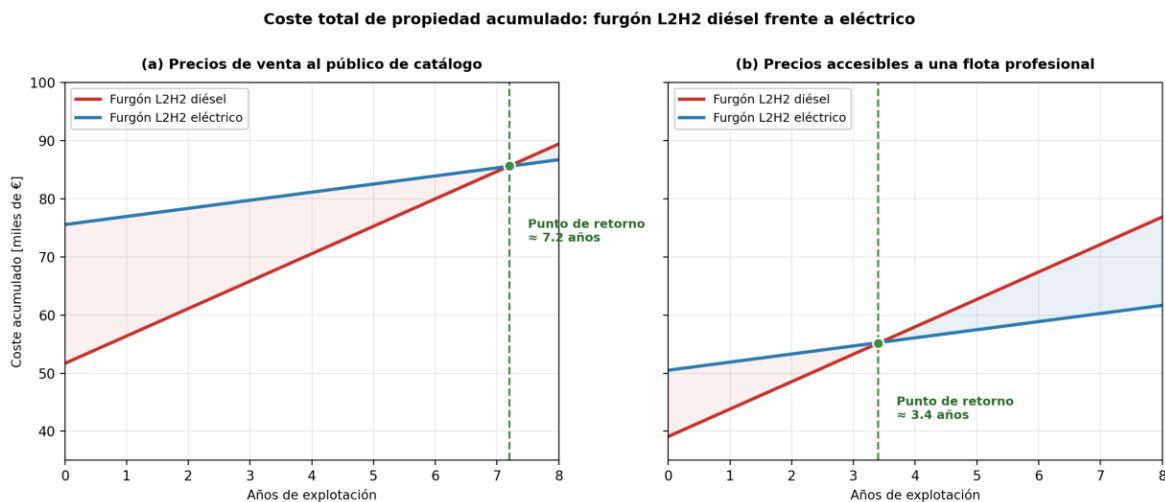


Figure 3: Cumulative total cost of ownership of the L2H2 van, diesel versus electric, by purchase price – Source: own elaboration

4. CONCLUSIONS

Six main conclusions can be drawn from the study.

First, renewing the fleet does not decarbonise: it is an air-quality policy, not a climate mitigation one, and its reduction capacity is further bounded by a floor that diesel technology cannot overcome.

Second, electrification is the only lever capable of reducing CO₂, but it leaves an irreducible residue associated with the cold chain.

Third, the challenge shifts from the vehicle to the grid, although in a more manageable way than might be expected: last-mile charging is slow, nocturnal and predictable, is resolved with moderate-power chargers and, by concentrating in off-peak hours, proves favourable for the electricity system.

Fourth, the microhub transforms the problem, it does not eliminate it: it should be conceived as a selective measure, applicable to the areas of greatest restriction, rather than as a generalisable solution.

Fifth, economic feasibility is not decided in operation, but in the purchase: the operating saving is beyond question, but it is the acquisition price that determines whether the investment is recovered.

Sixth, the barrier is structural, not technological. The large operator, purchasing in volume, is already in the economically favourable scenario; the self-employed haulier, buying at list price and financing the charging point alone, faces a seven-year horizon that their margin cannot sustain. It is not that the electric vehicle is not profitable: it is that its profitability arrives too late for those who cannot wait.

From this follows the main recommendation to the administration: the most effective public lever is purchase support, targeted at the segment facing the effective barrier, since it acts on the only term that determines the outcome.

It should finally be noted that the model works with a representative fleet of adjustable size rather than with Madrid's actual census, which does not exist publicly. Absolute magnitudes therefore scale with that size, whereas relative results (reduction percentages, payback period, microhub multiplier) are independent of it. The work delivers, more than closed figures, a replicable methodology, transferable to other fleets and other cities by substituting their own input data.

5. REFERENCES

- [1] European Environment Agency, «Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport», jun. 2022. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/transport-and-environment-report2021>
- [2] Transport for London, «Freight and servicing action plan», Mayor of London, 2019. Disponible en: <https://content.tfl.gov.uk/freight-servicing-action-plan.pdf>
- [3] Rhenus Group, «Rhenus Home Delivery's electric fleet has grown to 300 vehicles», sep. 2024. Disponible en: <https://www.rhenus.group/>
- [4] EMT Madrid, «Un "microhub" logístico en el parking de Plaza Mayor para impulsar el reparto de bajas emisiones», oct. 2021. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/>
- [5] City of Gothenburg, «Stadsleveransen: A success story», CIVITAS / Urban Transport Administration, sep. 2016. Disponible en: <https://civitas.eu/>
- [6] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), «Informe Anual del Sector Postal», Madrid, jul. 2025. Disponible en: <https://www.cnmc.es/sites/default/files/6089770.pdf>
- [7] Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), «Envejecimiento del parque», feb. 2024. Disponible en: <https://anfac.com/>

[8] European Environment Agency (EEA), «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 — 1.A.3.b.i-iv Road transport (exhaust emissions)», 2023. Disponible en: <https://copert.emisia.com/>

Índice

Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Contexto	8
1.2 Motivación	10
1.3 Objetivos	11
1.4 Alcance	12
1.5 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	13
1.6 Estructura de la memoria	14
Capítulo 2. Estado del arte	15
2.1 Introducción	15
2.2 Tecnologías de propulsión	16
2.3 Casos de referencia europeos	18
2.4 Nuevos modelos logísticos	19
2.5 Infraestructura de recarga	21
2.6 Viabilidad económica y barreras de adopción	24
2.7 Conclusión y retos	26
Capítulo 3. Análisis y caracterización de la flota de vehículos	28
3.1 Reparto de paquetería (B2C)	28
3.1.1 EL MAPA COMERCIAL: Operadores tradicionales y la integración vertical	29
3.1.2 LA REALIDAD OPERATIVA: El peso de la subcontratación y los autónomos	29
3.1.3 COMPOSICIÓN TÉCNICA DE LA FLOTA B2C	30
3.2 Flota B2B	36
3.3 Flota total de última milla	41
3.4 Antigüedad de la flota	43
3.5 Horarios del reparto	45
3.6 Caracterización técnica de la flota	47
3.6.1 Parámetros de caracterización	47
3.6.2 Flota de combustión interna	48
3.6.3 Flota 100% eléctrica	49
3.6.4 Factores de emisión	50

3.6.5 Resumen de la flota de referencia de última milla	54
Capítulo 4. Modelo de simulación	55
4.1 Estructura y dinámica del modelo	55
4.2 Parámetros de entrada.....	58
4.3 Definición de los escenarios	59
4.3.1 Escenario A: Velocidad de renovación	59
4.3.2 Escenario B: Tecnología de renovación.....	59
4.3.3 Escenario C: Composición del parque.....	60
Capítulo 5. Resultados de evolución de parque	61
5.1 Resultados del escenario A: Velocidad de renovación.....	61
5.2 Resultados del escenario B: Tecnología de renovación	63
5.3 Resultados del escenario C: Composición del parque.....	67
Capítulo 6. Dimensionamiento de la infraestructura de recarga.....	70
6.1 Planteamiento y alcance	70
6.2 Datos de partida y comprobación de autonomía.....	72
6.3 Metodología de dimensionamiento	75
6.4 Selección de cargadores por tipo de vehículo.....	77
6.5 Puntos de recarga, potencia total e implicaciones	79
Capítulo 7. Modelo y dimensionamiento del microhub.....	81
7.1 Planteamiento y alcance	81
7.2 Emplazamiento de referencia	83
7.3 Dimensionamiento del microhub.....	84
7.4 Infraestructura de recarga del microhub	88
7.5 Esquema de implantación y escalado a red	91
Capítulo 8. Análisis económico	93
8.1 Planteamiento y estructura de costes	93
8.2 Parámetros de cálculo	95
8.3 Resultados: TCO comparado y punto de retorno	97
Capítulo 9. Conclusiones	99
9.1 Cumplimiento de los objetivos.....	99

9.2 Conclusiones técnicas.....	100
9.3 Limitaciones del estudio.....	103
9.4 Escalabilidad y replicabilidad	105
9.5 Líneas de trabajo futuras	107
9.6 Recomendación final.....	109
Capítulo 10. Bibliografía.....	111
Anexo A. Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible.....	115
A.1 Introducción	115
A.2 ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles	115
A.3 ODS 13. Acción por el clima	116
A.4 ODS 3. Salud y bienestar	116
A.5 ODS 9. Industria, innovación e infraestructura.....	117
A.6 Reflexión final.....	117
Anexo B. Código del modelo de simulación	118
B1. Introducción	118
B.2 Estructura del código.....	118
B.3 Parámetros ajustables	119
B.4 Código fuente	119

Índice de Tablas

Tabla 1: Síntesis de los resultados de los tres escenarios de descarbonización (horizonte 2050) – Fuente: elaboración propia.....	8
Tabla 2: Emisiones directas (Tank-to-Wheel) - Fuente: Elaboración propia.....	16
Tabla 3: Flota de referencia B2C – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	35
Tabla 4: Flota de referencia B2B – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	39
Tabla 5: Flota de última milla – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.....	42
Tabla 6: Distribución de antigüedad por perfil de flota - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	44
Tabla 7: Características de vehículos de combustión - Fuente: elaboración propia	48
Tabla 8: Características de vehículos 100% eléctricos - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.	49
Tabla 9: Factores de emisión del vehículo de referencia - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.	51
Tabla 10: Factores de emisión NO _x y PM por norma Euro y antigüedad. Furgonetas diésel – Fuente: elaboración propia a partir de [14]	52
Tabla 11: Factores de emisión NO _x y PM por norma Euro y antigüedad. Camiones diésel – Fuente: elaboración propia a partir de [14]	52
Tabla 12: Factores de emisión NO _x y PM por norma Euro y antigüedad. Motocicletas de gasolina – Fuente: elaboración propia a partir de [36]	53
Tabla 13: Tabla resumen de la flota de referencia de última milla - Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 14: Energía diaria a reponer y fracción de batería por tipo de vehículo – Fuente: elaboración propia a partir del apartado 3.6.3	73
Tabla 15: Asignación de cargador y tiempo de recarga por tipo de vehículo – Fuente: elaboración propia; escalones de potencia según IEC 61851 [11]	78

Tabla 16: Dimensionado funcional del microhub de referencia – Fuente: elaboración propia	85
Tabla 17: Desglose de la superficie requerida por el microhub de referencia - Fuente: elaboración propia	87
Tabla 18: Infraestructura de recarga del microhub de referencia – Fuente: elaboración propia	89
Tabla 19: Parámetros del análisis de coste total de propiedad (furgón L2H2) – Fuente: elaboración propia a partir de las referencias citadas	95
Tabla 20: Parámetros ajustables del modelo de simulación – Fuente: elaboración propia	119

Índice de Figuras

Figura 1: Evolución de las emisiones de CO ₂ , NO _x y partículas en el escenario B, según la tecnología de renovación – Fuente: elaboración propia.....	9
Figura 2: Esquema de implantación del microhub de referencia – Fuente: elaboración propia	10
Figura 3: Coste total de propiedad acumulado del furgón L2H2, diésel frente a eléctrico, según el precio de adquisición – Fuente: elaboración propia.....	11
Figura 4: Ejemplo de calles del centro de Madrid – Fuente: Dreamstime	19
Figura 5: Modos de recarga de vehículos eléctricos según la norma IEC 61851 – Fuente: elaboración propia a partir de [11]	22
Figura 6: Precio de la electricidad en España (19/02/2026)– Fuente: Red Eléctrica.....	23
Figura 7: Flota del Grupo Correos - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	31
Figura 8: Flota de los grandes operadores privados - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	32
Figura 9: Flota de Amazon Logistics - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.....	33
Figura 10: Flota de autónomos - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	34
Figura 11: Comparativa de tamaños de furgones - Fuente: Camperizando	34
Figura 12: Flota de referencia B2C – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.....	35
Figura 13: Flota del canal HORECA y alimentación – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	37
Figura 14: Flota de paquetería empresarial y retail – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	38
Figura 15: Flota de referencia B2B – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.....	40

Figura 16: Flota de última milla – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas	41
Figura 17: Línea de tiempo del horario de la flota de última milla - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas'	46
Figura 18: Esquema del ciclo anual del modelo de simulación – Fuente: elaboración propia	57
Figura 19: Panel de tres gráficas (CO ₂ , NO _x , PM) del escenario A - Fuente: elaboración propia.....	61
Figura 20: Panel de tres gráficas (CO ₂ , NO _x , PM) del escenario B - Fuente: elaboración propia.....	63
Figura 21: Gráfica de demanda de energía eléctrica del escenario B - Fuente: elaboración propia.....	65
Figura 22: Panel de tres gráficas (CO ₂ , NO _x , PM) del escenario C - Fuente: elaboración propia.....	67
Figura 23: Gráficas de demanda de energía y de tamaño de la flota del escenario C - Fuente: elaboración propia	68
Figura 24: Esquema de implantación del microhub de referencia – Fuente: elaboración...	91
Figura 25: Coste total de propiedad acumulado del furgón L2H2, diésel frente a eléctrico, según el precio de adquisición – Fuente: elaboración propia.....	97

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

En el contexto actual de emergencia climática, la descarbonización de la economía se ha convertido en una prioridad global. La Unión Europea ha fijado el objetivo de alcanzar la neutralidad climática en 2050 a través del Pacto Verde Europeo, y ha situado al transporte en el centro de esa estrategia por una razón de peso: es responsable de aproximadamente una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión y, además, es el único gran sector cuyas emisiones no han descendido respecto a los niveles de 1990, sino que han aumentado [1]. Reducir su huella es, por tanto, una condición necesaria para cumplir los compromisos climáticos europeos.

Dentro del transporte, la logística urbana ha adquirido un protagonismo creciente por efecto del auge del comercio electrónico. Las compras en línea han aumentado en los últimos años multiplicando el número de entregas de pequeño volumen en las ciudades. Esto sumado al reparto tradicional a restaurantes, tiendas y otros negocios ha intensificado la presión sobre el último tramo de la cadena de suministro, la denominada última milla. Este eslabón final es crítico por dos motivos que rara vez van separados. Por un lado, concentra una parte muy elevada del coste logístico total del envío, lo que lo convierte en el foco natural de la optimización operativa. Por otro, es el que genera las externalidades más visibles en el entorno urbano: congestión, ruido y contaminación del aire en las zonas de mayor densidad de población.

El peso ambiental de la distribución urbana de mercancías es, de hecho, marcadamente desproporcionado respecto a su presencia en el tráfico. Aunque el transporte de mercancías por carretera supone en torno al 10-15 % de los vehículos-kilómetro que circulan por las ciudades, se le atribuye una fracción muy superior de las externalidades: del orden del 25 % de las emisiones de CO₂, el 30 % de las de óxidos de nitrógeno (NO_x) y hasta el 50 % de las partículas en suspensión [2]. Esta asimetría entre ocupación de la vía e impacto ambiental es precisamente lo que convierte a la última milla en un objetivo prioritario de las políticas de movilidad sostenible: actuar sobre una fracción reducida del parque circulante permite incidir sobre una parte muy relevante de las emisiones del tráfico urbano.

La ciudad de Madrid no es ajena a este fenómeno. Sobre una red viaria ya fuertemente tensionada, la distribución urbana de mercancías ejerce una presión ambiental y circulatoria considerable. El Ayuntamiento de Madrid presenta que los vehículos de distribución urbana representan el 10% de los vehículos-kilómetro recorridos y son responsables del 21% de las emisiones de óxidos de nitrógeno y de más del 14% de las de CO₂ [3]. Ante esta realidad, Madrid ha desarrollado un marco normativo orientado a limitar el impacto del tráfico contaminante, articulado en torno a la estrategia Madrid 360 y a la progresiva restricción de acceso de los vehículos más contaminantes a través de las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE). Este marco sitúa al modelo de distribución urbana de mercancías en un punto de inflexión: las flotas comerciales de última milla deben transitar hacia tecnologías más limpias para poder seguir operando en una ciudad inmersa en un proceso de descarbonización. Existen ya soluciones tecnológicas y operativas para acometer esa transición, desde la electrificación de las flotas hasta la reorganización logística mediante microhubs, cuyo estado de madurez se analiza en detalle en el Capítulo 2. . El presente trabajo se sitúa en este escenario de

transición tecnológica y normativa, con el objetivo de evaluar la viabilidad de esas alternativas y aportar soluciones cuantificadas y adaptadas a las condiciones específicas del entorno urbano de Madrid.

1.2 MOTIVACIÓN

Como se expondrá en el Capítulo 2, existen soluciones tecnológicas maduras y casos de éxito bien documentados en ciudades como Londres, Berlín o Gotemburgo. Sin embargo, la extrapolación directa de esos modelos a la ciudad de Madrid no es ni inmediata ni trivial. La capital española presenta condicionantes propios: una estructura de flota fuertemente fragmentada, con un peso muy elevado del transportista autónomo y la subcontratación, un centro urbano densamente congestionado y un marco normativo ambiental en evolución constante que impiden trasladar sin más las conclusiones obtenidas en otros entornos y obligan a un análisis específico.

La motivación principal de este proyecto nace de la necesidad de aterrizar esa teoría general a la realidad operativa de Madrid. Los operadores logísticos se enfrentan hoy a una doble incertidumbre, técnica y económica: saben que deben descarbonizar su actividad para cumplir con la normativa de las Zonas de Bajas Emisiones, pero carecen de estudios detallados que cuantifiquen el coste real de esa transición y el dimensionamiento exacto de la infraestructura de recarga necesaria para sostenerla. Esta carencia de información cuantitativa dificulta la toma de decisiones y ralentiza una transición que la normativa exige de forma cada vez más apremiante.

Este Trabajo de Fin de Grado se justifica, por tanto, por la urgencia de dotar al sector de un análisis riguroso y cuantificado. No basta con proponer el cambio al vehículo eléctrico: es necesario calcular su viabilidad frente al diésel, estimar el impacto real de las distintas estrategias de renovación y electrificación sobre las emisiones, y evaluar en qué medida la reorganización logística puede contribuir a la descarbonización. En definitiva, el estudio pretende servir como herramienta de soporte a la toma de decisiones, demostrando que la descarbonización de la última milla en Madrid no es únicamente un imperativo ambiental, sino también un desafío de optimización industrial que requiere soluciones cuantificadas y adaptadas al entorno.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es evaluar, mediante un modelo de simulación, la viabilidad técnica y ambiental de distintas estrategias de descarbonización de la flota de distribución de última milla de la ciudad de Madrid en el horizonte 2026-2050. El estudio parte de la caracterización del parque actual y proyecta su evolución bajo diferentes palancas de transición, la velocidad de renovación de los vehículos, la tecnología de sustitución y la reorganización de la composición del parque, cuantificando para cada una su impacto sobre las emisiones y sobre la demanda energética asociada.

Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos específicos:

1. **Caracterizar el parque de última milla de partida:** definiendo su composición por tipo de vehículo y tecnología de propulsión, su distribución de antigüedad y la norma Euro asociada, así como los factores de consumo y de emisión (CO_2 , NO_x y partículas) de cada tipo de vehículo.
2. **Desarrollar un modelo de simulación de la evolución de la flota:** capaz de reproducir el envejecimiento natural del parque y su renovación progresiva año a año a lo largo del horizonte de estudio, manteniendo la trazabilidad entre la antigüedad de cada vehículo, su norma de homologación y sus emisiones.
3. **Definir y simular escenarios de descarbonización:** evaluando de forma independiente el efecto de la velocidad de renovación de la flota (Escenario A), de la tecnología con la que se sustituyen los vehículos retirados (Escenario B) y de la reorganización del parque mediante microhubs (Escenario C), y cuantificando para cada uno la evolución de las emisiones de CO_2 , NO_x y partículas.
4. **Cuantificar la demanda de energía eléctrica:** que conlleva la electrificación de la flota, como magnitud determinante para valorar la viabilidad de la transición y dimensionar la infraestructura necesaria para sostenerla.
5. **Dimensionar la infraestructura de recarga:** requerida para dar servicio a la flota electrificada, a partir de la demanda energética obtenida en la simulación y de la ventana de recarga disponible.
6. **Diseñar y dimensionar el modelo de microhub:** Diseñar y dimensionar un microhub de referencia: seleccionando un emplazamiento en el centro urbano, determinando el volumen de mercancía que gestiona, la flota capilar que opera desde él, la superficie que requiere y su infraestructura de recarga, como materialización física de la reorganización logística evaluada en el escenario C.
7. **Evaluar la viabilidad económica:** de la transición mediante un análisis del Coste Total de Propiedad (TCO), comparando el escenario de flota diésel con el escenario electrificado.

1.4 ALCANCE

El presente trabajo acota su análisis a la flota de distribución de última milla que opera en la ciudad de Madrid, entendida como el conjunto de vehículos dedicados al reparto de paquetería a particulares (B2C) y al abastecimiento comercial y empresarial (B2B), incluido el canal HORECA (Hoteles, Restaurantes y Caterings). Quedan fuera del estudio el transporte de largo recorrido, la distribución interurbana y el tráfico de mercancías ajeno a la última milla. Ante la ausencia de un censo oficial que cuantifique el parque real, el trabajo opera sobre una flota representativa, construida a partir de las cuotas de mercado de los principales operadores y de hipótesis de diseño justificadas, cuyo tamaño absoluto actúa como factor de escala y no condiciona las conclusiones, expresadas en términos relativos.

El horizonte temporal del análisis abarca desde el año base 2026 hasta 2050, en coherencia con el objetivo de neutralidad climática de la Unión Europea y con una duración suficiente para que el parque se renueve por completo varias veces. El estudio se plantea, además, a nivel de flota y no de ruta individual: el modelo proyecta la evolución agregada del parque de vehículos, sin descender al detalle de la asignación de rutas, la localización de paradas o la optimización del recorrido de cada vehículo.

En cuanto al impacto ambiental, el trabajo adopta un alcance Tank-to-Wheel (del depósito a la rueda): se contabilizan únicamente las emisiones generadas por el vehículo durante su circulación, y no las asociadas a la producción del combustible o de la electricidad que consume. Bajo este enfoque, los vehículos 100 % eléctricos se consideran de cero emisiones directas, criterio coherente con el que emplean las Zonas de Bajas Emisiones para clasificar los vehículos. Se caracterizan tres contaminantes: el dióxido de carbono (CO₂), como gas de efecto invernadero de alcance global, y los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas en suspensión (PM), como contaminantes locales que afectan a la calidad del aire urbano. Quedan expresamente fuera del alcance las emisiones de ciclo de vida completo (Well-to-Wheel o Life Cycle Assessment), tanto de los vehículos como de las baterías.

Estos tres bloques se abordan, no obstante, con un alcance acotado. La infraestructura de recarga se dimensiona a escala agregada de flota y de emplazamiento, determinando el número de puntos de recarga y la potencia necesaria, sin descender al proyecto eléctrico de la instalación. El microhub se dimensiona funcionalmente sobre un emplazamiento de referencia, con su volumen de mercancía, su flota capilar, su superficie y su esquema de implantación, sin constituir un proyecto constructivo de ejecución ni abordar la optimización de la localización de una red completa de instalaciones. Por último, el análisis económico se plantea como estimación del coste total de propiedad a escala de vehículo, tomando el arquetipo dominante de la flota como referencia, y no como modelo financiero detallado del conjunto del sector.

1.5 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El presente trabajo se enmarca en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas. La descarbonización de la logística de última milla en Madrid contribuye de forma directa a varios de sus objetivos, de los que este proyecto guarda relación principalmente con cuatro:

ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles. Constituye el eje central del trabajo. El análisis de la electrificación de la flota y de la reorganización del reparto mediante microhubs se dirige a reducir el impacto ambiental de la distribución urbana de mercancías, en línea con la meta 11.6, orientada a disminuir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, con especial atención a la calidad del aire. Al cuantificar cómo distintas estrategias afectan a las emisiones en el entorno urbano, el estudio aporta criterio para orientar la actividad logística hacia un modelo más sostenible.

ODS 13. Acción por el clima. El transporte es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, y su descarbonización es una condición necesaria para los compromisos climáticos. El proyecto aborda la meta 13.2, relativa a la incorporación de medidas relacionadas con el clima en las estrategias y la planificación, al evaluar en qué medida la sustitución de vehículos de combustión por vehículos eléctricos reduce las emisiones de CO₂ de la flota. La cuantificación de esa reducción es uno de los resultados principales del estudio.

ODS 3. Salud y bienestar. Más allá del impacto climático global, la logística urbana afecta a la salud pública a través de la emisión de contaminantes locales en las zonas de mayor densidad de población. Al caracterizar y cuantificar las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas de la flota, y su evolución bajo las distintas estrategias, el trabajo se alinea con la meta 3.9, que persigue reducir las muertes y enfermedades causadas por la contaminación del aire.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructura. El proyecto contribuye a este objetivo en dos planos. Por un lado, aporta una herramienta de modelización que apoya la transición hacia una logística urbana más limpia y eficiente. Por otro, desciende al dimensionamiento de la infraestructura que esa transición requiere: tanto la red de recarga necesaria para sostener una flota electrificada como la reconversión de infraestructuras urbanas ya existentes, en particular los aparcamientos subterráneos del centro, en nodos logísticos de distribución sostenible. Esta aproximación se alinea con la meta 9.4, orientada a modernizar las infraestructuras y reconvertir las industrias para hacerlas sostenibles, mediante un uso más eficiente de los recursos y una mayor adopción de tecnologías limpias.

1.6 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria se organiza en once capítulos, que siguen la secuencia lógica del trabajo: del diagnóstico del punto de partida a la proyección de su evolución, y de ahí a la materialización física y económica de la transición.

El Capítulo 2. revisa el estado de la técnica. Analiza las tecnologías de propulsión disponibles y los casos de referencia europeos, los nuevos modelos logísticos basados en la ruptura de carga, la infraestructura de recarga que la electrificación de flotas exige y las barreras económicas que condicionan su adopción, para concluir identificando el vacío que este trabajo aborda.

El Capítulo 3 construye el punto de partida del modelo. Los primeros apartados caracterizan la flota de última milla de Madrid, segmentándola entre el reparto de paquetería (B2C) y la distribución comercial (B2B), y definiendo su composición por tipo de vehículo y su distribución de antigüedad. El apartado 3.5 establece la ventana horaria de operación del reparto, parámetro que determina tanto el kilometraje diario como el tiempo disponible para la recarga. El apartado 3.6.3 completa la caracterización asignando a cada tipo de vehículo sus parámetros técnicos (consumo, batería y autonomía) y sus factores de emisión de CO₂, óxidos de nitrógeno y partículas.

Los Capítulos 4 y 5 constituyen el núcleo del trabajo. El Capítulo 4. describe el modelo de simulación desarrollado, su estructura de cohortes, sus parámetros de entrada y los tres escenarios de descarbonización que explora. El Capítulo 5. presenta y analiza los resultados obtenidos para cada uno de ellos, en términos de emisiones y de demanda de energía eléctrica.

Los Capítulos 6 a 8 trasladan la transición del plano de la proyección al de su materialización. El Capítulo 6. dimensiona la infraestructura de recarga necesaria para sostener una flota electrificada, a partir de la demanda energética obtenida en la simulación. El Capítulo 7. desarrolla el modelo de microhub, con el dimensionado funcional de una instalación de referencia y su esquema de implantación. El Capítulo 8. evalúa la viabilidad económica de la transición mediante un análisis del coste total de propiedad.

Por último, el Capítulo 9. recoge las conclusiones del trabajo, sus limitaciones, su escalabilidad y replicabilidad a otras flotas y ciudades, las líneas de trabajo futuras y las recomendaciones dirigidas a los actores de la transición. La memoria se cierra con la bibliografía y los anexos, que incluyen la reflexión sobre la alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el código del modelo de simulación desarrollado en MATLAB.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

La distribución urbana de mercancías se encuentra en una situación paradójica: es el motor que sostiene el abastecimiento de la ciudad y, al mismo tiempo, resulta insostenible en su configuración actual. El diagnóstico europeo no deja lugar a dudas. Según el informe TERM de la Agencia Europea de Medio Ambiente, el transporte es el único sector cuyas emisiones han aumentado respecto a los niveles de 1990 en el conjunto de la Unión Europea, frente a la reducción lograda por el resto de la economía [4]. La magnitud del reto pendiente se aprecia al contrastar este dato con el objetivo del Pacto Verde Europeo, que fija una reducción del 90 % de las emisiones del transporte para 2050: las proyecciones actuales apuntan a que, sin una intervención decidida sobre la tecnología y sobre la gestión de la demanda, la disminución no superaría el 22 % [4].

Sobre este marco general, la última milla concentra una responsabilidad desproporcionada. Se trata del eslabón final de la cadena de suministro, aquel en el que la mercancía se fragmenta y alcanza su destino, y es también el más ineficiente: opera con vehículos de baja ocupación, en trayectos cortos, con paradas constantes y en el entorno urbano más congestionado. El auge del comercio electrónico ha multiplicado la presión sobre este eslabón, incrementando el número de entregas y, con ellas, la intensidad del tráfico de reparto en el interior de las ciudades.

Ante esta situación, las respuestas ensayadas hasta la fecha en el ámbito urbano se articulan en torno a tres palancas, que este capítulo revisa sucesivamente. La primera es tecnológica: sustituir el vehículo de combustión por alternativas de cero emisiones, fundamentalmente eléctricas. La segunda es organizativa: rediseñar la operativa logística mediante microhubs y centros de consolidación, de modo que se reduzca el número de vehículos que penetran en el centro urbano. La tercera, derivada de la primera, es habilitadora: dotar a las flotas electrificadas de la infraestructura de recarga que su operación exige. A ellas se añade, de forma transversal, la dimensión económica, que determina en última instancia si las dos primeras llegan a materializarse, y que constituye la barrera efectiva de la transición.

El capítulo se organiza, por tanto, en cuatro bloques. El primero revisa las tecnologías de propulsión y los casos de referencia europeos, así como los límites técnicos que la electrificación aún no resuelve. El segundo examina los nuevos modelos logísticos basados en la ruptura de carga. El tercero aborda la infraestructura de recarga, condición necesaria de la electrificación de flotas. El cuarto analiza el coste total de propiedad y las barreras económicas que frenan la adopción. El capítulo concluye identificando el vacío que el presente trabajo pretende cubrir.

2.2 TECNOLOGÍAS DE PROPULSIÓN

La descarbonización del reparto urbano pasa, en primer lugar, por la tecnología con la que se propulsa el vehículo. Las alternativas disponibles hoy en la última milla presentan grados de madurez y de eficacia muy desiguales.

El motor diésel es la tecnología dominante del reparto. Sus emisiones de CO₂ dependen únicamente del combustible consumido, mientras que las de óxidos de nitrógeno y partículas han descendido de forma drástica con las sucesivas normas Euro y, en particular, con la generalización del filtro de partículas. La gasolina, minoritaria en vehículos comerciales, emite menos NO_x y partículas que el diésel, pero consume más y emite algo más de CO₂ por kilómetro.

El gas natural comprimido (GNC) reduce el CO₂ y, sobre todo, las partículas, pero no elimina las emisiones de tubo de escape ni permite el acceso a las zonas de cero emisiones, por lo que no constituye una vía de descarbonización completa. Los híbridos enchufables ofrecen una reducción parcial, condicionada a que el vehículo circule efectivamente en modo eléctrico, algo que en la operación real no siempre ocurre.

El vehículo eléctrico de batería (BEV) es la única tecnología con cero emisiones directas y, por tanto, la única compatible con el acceso sin restricciones a las zonas de bajas emisiones. Su idoneidad para la última milla responde al perfil de la operación: recorridos diarios cortos y predecibles, velocidades bajas y regreso a una base fija cada noche, lo que permite resolver la recarga sin depender de infraestructura pública. El hidrógeno, por último, resulta prometedor para el transporte pesado de largo recorrido, pero su despliegue en la última milla es hoy marginal, tanto por el coste de los vehículos como por la práctica inexistencia de infraestructura de repostaje.

Tabla 2: Emisiones directas (Tank-to-Wheel) - Fuente: Elaboración propia

Tecnología	CO ₂	NO _x	PM	Acceso a ZBE	Madurez en última milla
Diésel	Alto	Medio	Bajo	Restringido	Dominante
Gasolina	Alto	Bajo	Bajo	Restringido	Minoritaria
GNC	Medio	Bajo	Muy bajo	Restringido (ECO)	Nicho
Híbrido enchufable	Medio-bajo	Bajo	Bajo	ECO	Creciente
Eléctrico (BEV)	Nulo	Nulo	Nulo	CERO	En expansión
Hidrógeno (FCEV)	Nulo	Nulo	Nulo	CERO	Marginal

La comparativa arroja una conclusión que orienta todo el trabajo. Frente a los contaminantes locales, varias tecnologías ofrecen mejoras sustanciales respecto al diésel. Pero frente al CO₂, la reducción solo es marcada en las tecnologías que prescinden por completo de la combustión: cualquier motor térmico emite dióxido de carbono en proporción directa al combustible que quema. Esta asimetría anticipa uno de los resultados centrales de la simulación: mejorar la tecnología de combustión limpia el aire de la ciudad, pero no descarboniza.

La madurez de la tecnología no significa, sin embargo, que sea aplicable de forma indiscriminada a toda la última milla. Existen segmentos en los que la electrificación tropieza con barreras técnicas que aún no están resueltas, y que resulta imprescindible identificar, ya que condicionan el alcance real de cualquier estrategia de descarbonización.

La primera y más determinante afecta al transporte con temperatura controlada. Los vehículos frigoríficos deben alimentar de forma continua un equipo de frío que consume energía con independencia de la tracción, tanto en marcha como durante las paradas de descarga. En un vehículo diésel, ese consumo se atiende desde el propio motor o desde un grupo auxiliar; en un vehículo eléctrico, compite directamente con la batería, reduciendo la autonomía disponible para el reparto. El sobreconsumo asociado al equipo de frío es sustancial: estudios sobre misiones reales de reparto urbano lo sitúan en el entorno del 19 % respecto al vehículo equivalente sin refrigerar [5]. Esta penalización, sumada a la mayor exigencia de la distribución alimentaria en términos de carga y de jornada, convierte a la cadena de frío en el segmento más resistente a la electrificación, y explica que los despliegues comerciales se hayan concentrado hasta ahora en el reparto de mercancía seca.

La segunda barrera afecta al transporte pesado. A medida que aumenta la masa máxima autorizada del vehículo, crece la capacidad de batería necesaria, lo que encarece el vehículo y penaliza su carga útil. Aunque ya existen camiones rígidos eléctricos aptos para la distribución urbana, su despliegue es todavía incipiente y su coste, muy superior al de sus equivalentes diésel.

Por este motivo, el presente trabajo centra su análisis en la electrificación, por ser la única tecnología de cero emisiones con implantación real y contrastada en el reparto urbano, pero incorpora explícitamente estos límites al modelo: los vehículos frigoríficos se consideran no electrificables, hipótesis cuyas consecuencias se cuantifican en el análisis de resultados.

2.3 CASOS DE REFERENCIA EUROPEOS

La electrificación del reparto urbano no es una posibilidad teórica: cuenta con despliegues reales y validados en operación en varias ciudades europeas. Su implantación, sin embargo, es marcadamente asimétrica, y depende principalmente de dos factores: la presión regulatoria que ejerce cada ciudad sobre el acceso de los vehículos contaminantes y la capacidad económica del entorno, medida por su PIB per cápita[4]. Dos casos ilustran las dos vías por las que esta transición ha avanzado.

Transición impulsada por la regulación: Londres

En Londres, el motor del cambio ha sido la presión normativa. La implantación de zonas de restricción severa, como la Ultra Low Emission Zone (ULEZ), ha forzado a los operadores a renovar su flota para poder seguir accediendo al centro. En ese entorno, operadores como Gnewt Cargo han demostrado la viabilidad de una operación de reparto íntegramente eléctrica. Según el plan de acción de transporte de mercancías de Transport for London, el modelo de Gnewt en el centro de la ciudad logró eliminar por completo las emisiones locales del reparto y reducir además la distancia total recorrida en un 20 %, gracias a la optimización de las rutas [6].

Este segundo dato es relevante, pues muestra que la electrificación, cuando va acompañada de una reorganización de la operativa, produce beneficios que exceden la mera sustitución del vehículo. La lección del caso londinense es que la restricción de acceso actúa como palanca eficaz: cuando circular con un vehículo contaminante deja de ser posible, la renovación de la flota pasa de ser una decisión de optimización económica a una condición de permanencia en el mercado.

Transición impulsada por el sector privado: Berlín

Berlín representa la vía complementaria, en la que la iniciativa parte del propio operador y no de la administración. El caso más destacado es la alianza logística entre IKEA y Rhenus Home Delivery: desde septiembre de 2024, más del 95 % de las entregas a domicilio de IKEA en el área metropolitana se realizan libres de emisiones. Para ello se ha desplegado una flota de 300 vehículos eléctricos y se han instalado 150 puntos de recarga propios, con un ahorro estimado de 2.700 toneladas anuales de CO₂ [7].

El caso resulta doblemente ilustrativo. Por un lado, confirma que una operación de reparto puede electrificarse a escala, y no solo en proyectos piloto de alcance limitado. Por otro, evidencia que la flota no viaja sola: desplegar trescientos vehículos eléctricos exigió instalar en paralelo ciento cincuenta puntos de recarga, esto es, una infraestructura dimensionada a la medida de la flota. Esta dependencia entre vehículo e infraestructura, que el caso berlinés hace explícita, es precisamente la que se aborda en el apartado siguiente.

2.4 NUEVOS MODELOS LOGÍSTICOS

La renovación tecnológica de la flota, por sí sola, no resuelve el problema de la última milla. Un furgón eléctrico emite cero contaminantes por el tubo de escape, pero ocupa el mismo espacio en la calle, genera la misma congestión y realiza el mismo número de paradas en doble fila que su equivalente diésel. La electrificación ataca las emisiones, pero no la ineficiencia estructural del reparto. Por ello, junto a la palanca tecnológica se ha desarrollado una segunda vía, de naturaleza organizativa, orientada a reducir el número de vehículos que penetran en el centro urbano mediante el rediseño de la operativa.

El principio común a todas estas soluciones es la ruptura de carga: en lugar de que cada operador introduzca en el centro sus propios vehículos de gran capacidad, la mercancía se transfiere en un punto intermedio a vehículos más pequeños y limpios, encargados de la entrega final. Se separa así el transporte troncal, que agrupa volumen y se realiza fuera del área sensible, de la distribución capilar, que se ejecuta en el interior con vehículos adecuados al entorno urbano. Dentro de esta lógica común, la práctica europea ha desarrollado dos tipologías de instalación, que difieren en su ubicación, en su escala y en la flota que operan.

Microhubs

Los microhubs son instalaciones logísticas de proximidad situadas en el interior de la propia ciudad, con frecuencia en el corazón del área restringida. Reciben la mercancía consolidada y la redistribuyen mediante vehículos de reparto capilar de cero emisiones, generalmente de dimensiones muy reducidas, como motocicletas eléctricas o bicicletas de carga, capaces de operar en el viario estrecho del casco histórico. Su reducido tamaño permite implantarlos en espacios ya existentes, sin necesidad de obra de nueva planta.



Figura 4: Ejemplo de calles del centro de Madrid – Fuente: Dreamstime

Madrid es una de las ciudades pioneras en este modelo. La estrategia Madrid 360 ha impulsado la reconversión de infraestructuras subterráneas en nodos logísticos, aprovechando la red de aparcamientos municipales del centro. El referente es el microhub

del aparcamiento de la Plaza Mayor, inaugurado en el marco del proyecto europeo LEAD, cuya operativa se apoya en motocicletas 100 % eléctricas para la entrega capilar, eliminando tanto las emisiones como el ruido en el entorno más sensible de la ciudad. El proyecto se distingue, además, por emplear tecnología de gemelos digitales para modelizar y optimizar la distribución antes de su implantación física [8]. Este caso constituye el precedente directo sobre el que se apoya el modelo de microhub desarrollado en el presente trabajo.

Centros de consolidación urbana

Los centros de consolidación urbana responden al mismo principio, pero con una configuración distinta. Se sitúan en el perímetro de la ciudad o de la zona de bajas emisiones, y no en su interior, lo que les permite disponer de mayor superficie y recibir vehículos pesados sin las restricciones de acceso ni de gálibo que condicionan a los microhubs. Su flota de salida, en consecuencia, no se limita a vehículos ligeros: junto a bicicletas de carga se emplean habitualmente furgonetas eléctricas de mayor capacidad. Su valor añadido reside en la consolidación propiamente dicha: agrupan en una única entrega la mercancía que distintos proveedores destinan a un mismo comercio.

El referente de este modelo es el proyecto Stadsleveransen de Gotemburgo, operativo desde 2014, que ha logrado sustituir las cinco o seis visitas diarias de proveedores que recibía cada comercio por una única entrega consolidada, empleando una flota mixta de vehículos eléctricos y bicicletas de carga. El sistema, de titularidad público-privada, incorpora además logística inversa para la gestión de los residuos comerciales [9]. En Londres, el centro de consolidación de Regent Street obtuvo resultados equivalentes, reduciendo en un 77 % el tráfico de entrega a los comercios adheridos [6].

El coste de la desconsolidación

Estos modelos, sin embargo, no son gratuitos, y conviene señalar desde ahora su contrapartida, ya que constituye el eje del análisis desarrollado más adelante en este trabajo. La ruptura de carga sustituye un vehículo de gran capacidad por varias unidades pequeñas que, en conjunto, deben cubrir el mismo volumen de mercancía. El resultado inmediato es una multiplicación del número de vehículos en circulación y, dado que cada uno recorre su propia ruta, un incremento de los kilómetros totales. A ello se añade el coste de la propia instalación, de su operación y de la manipulación adicional que introduce la transferencia de la mercancía.

El microhub, por tanto, no elimina el problema del reparto: lo transforma. Cambia emisiones y penetración de vehículos pesados en el centro por un mayor número de vehículos ligeros, más kilómetros recorridos y una infraestructura que financiar. Que ese intercambio resulte o no favorable depende de la magnitud relativa de ambos efectos, cuestión que la literatura consultada aborda de forma cualitativa, pero que rara vez se cuantifica de manera integrada para una ciudad concreta. Esa cuantificación es uno de los objetivos del presente trabajo.

2.5 INFRAESTRUCTURA DE RECARGA

La electrificación de una flota no se agota en la sustitución del vehículo. Un furgón eléctrico solo es operativo si dispone de un punto donde reponer cada día la energía consumida, y ese requisito traslada una parte sustancial del reto de la descarbonización desde el vehículo hacia la infraestructura y la red eléctrica que debe sostenerla. El caso de Berlín citado anteriormente lo ilustra con claridad: junto a los 300 vehículos eléctricos desplegados fue necesario instalar 150 puntos de recarga propios [7]. La infraestructura no es un accesorio de la flota, sino una condición de su existencia.

Esta condición no queda como decisión del operador, sino que el marco normativo español la impone de forma creciente. Por un lado, el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, a través de su instrucción ITC-BT-52, regula específicamente las instalaciones destinadas a la recarga de vehículos eléctricos, estableciendo los esquemas de conexión admisibles, las protecciones exigidas y los criterios de previsión de carga que debe cumplir toda instalación nueva. Por otro, el Real Decreto-ley 29/2021 obliga a los aparcamientos no residenciales a dotarse de puntos de recarga, con una exigencia mínima de uno por cada cuarenta plazas, que se eleva a uno por cada veinte en los aparcamientos de titularidad pública [10]. Esta última obligación resulta especialmente relevante para el presente trabajo, pues convierte la red de aparcamientos subterráneos municipales (el emplazamiento sobre el que se dimensiona el microhub) en una infraestructura que ya debe contar con capacidad de recarga.

En cuanto a la flota, la presión normativa opera hoy de forma indirecta pero eficaz. No existe en España una obligación general que imponga a las empresas la electrificación de sus vehículos, pero las Zonas de Bajas Emisiones producen un efecto equivalente: al restringir progresivamente el acceso de los vehículos más contaminantes al centro urbano, convierten la renovación de la flota en una condición de permanencia en el mercado más que en una decisión de optimización económica. A ello se añade una tendencia regulatoria en curso, tanto en el ámbito estatal, con la reciente Ley de Movilidad Sostenible, como en el europeo, donde se debate el establecimiento de cuotas mínimas de vehículos de cero emisiones en las adquisiciones de las flotas corporativas. El sentido de la evolución normativa es, en todo caso, inequívoco, y refuerza la necesidad de anticipar el dimensionamiento de la infraestructura que esa transición exigirá.

Modos de recarga

La recarga de vehículos eléctricos está normalizada por la norma IEC 61851, que distingue distintos modos según la forma en que se establece la conexión y se gestiona la comunicación entre el vehículo y el punto de carga [11]. A efectos prácticos, la distinción determinante es la que separa la recarga en corriente alterna de la recarga en corriente continua.

En corriente alterna, la energía se entrega al convertidor de a bordo del vehículo, que es quien la transforma para cargar la batería. La potencia queda limitada por ese convertidor y por el tipo de acometida, con valores de referencia de 7,4 kW en instalación monofásica y de 11 o 22 kW en instalación trifásica [11]. Son potencias moderadas que implican tiempos de recarga largos, de varias horas, pero que requieren equipos sencillos y de coste reducido.

En corriente continua, el punto de recarga incorpora la conversión y entrega la energía directamente a la batería, sorteando la limitación del convertidor de a bordo. Esto permite potencias muy superiores y tiempos de recarga notablemente menores, a costa de un equipo considerablemente más caro y de una mayor exigencia sobre la red de distribución.

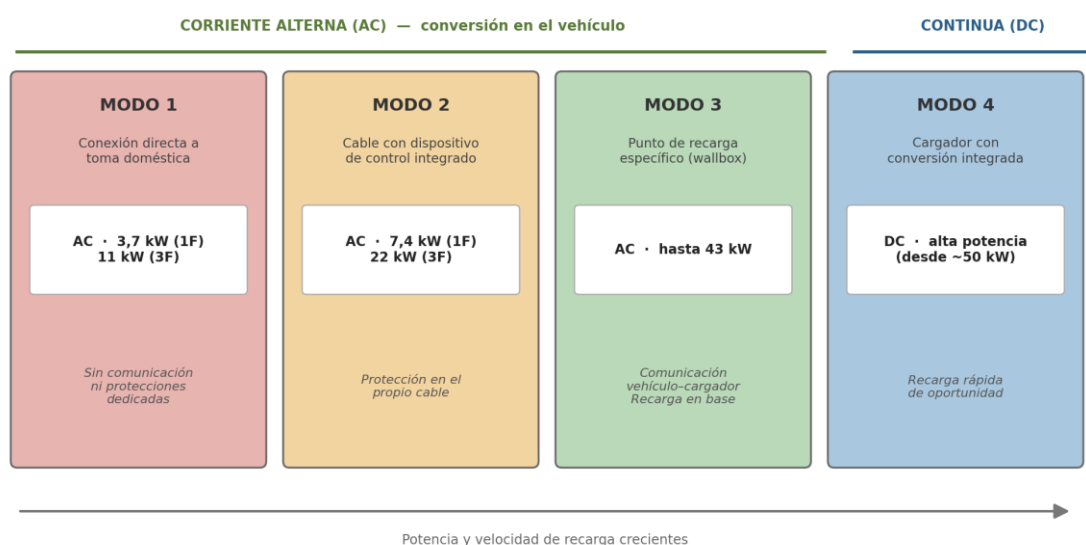


Figura 5: Modos de recarga de vehículos eléctricos según la norma IEC 61851 – Fuente: elaboración propia a partir de [11]

Recarga en base frente a recarga de oportunidad

Esta distinción técnica se traduce en dos estrategias de operación radicalmente distintas. La recarga de oportunidad consiste en reponer energía durante la jornada, en puntos de acceso público o en destino, y descansa habitualmente sobre corriente continua de alta potencia, ya que el vehículo dispone de poco tiempo. La recarga en base, por el contrario, aprovecha el largo periodo en que el vehículo permanece estacionado en su depósito, típicamente durante la noche, para reponer la energía con potencias bajas.

Para una flota de reparto, la recarga en base presenta ventajas decisivas. La operación de última milla es predecible: los vehículos recorren distancias conocidas y regresan cada día a un punto fijo, donde permanecen inmovilizados muchas horas. Esa amplia ventana de disponibilidad permite recargar con equipos de baja potencia, mucho más económicos, y evita depender de una infraestructura pública cuya ocupación no se controla. La recarga en base es, en consecuencia, el modelo de referencia para las flotas profesionales, y es el que adopta el presente trabajo.

Gestión de la recarga y horas valle

La disponibilidad de una ventana amplia abre además una posibilidad que resulta central para el dimensionamiento: la de gestionar cuándo carga cada vehículo. Si todos los vehículos de una flota se conectan simultáneamente al finalizar la jornada, la instalación debe soportar un pico de potencia igual a la suma de todos sus puntos de recarga. Si, por el contrario, las

conexiones se escalonan a lo largo de la noche, la misma energía se entrega con una potencia instantánea mucho menor, lo que reduce tanto la potencia a contratar como el refuerzo de red necesario.

Esta gestión permite, además, situar la recarga en las horas valle del sistema eléctrico, aquellas de menor demanda, habitualmente nocturnas. Hacerlo reporta un doble beneficio. Para el operador, un beneficio económico directo, ya que el precio de la electricidad en esas horas es sensiblemente inferior como muestra la Figura 6, lo que reduce el coste de explotación de la flota. Para el sistema eléctrico, un beneficio estructural: la carga de la flota rellena el valle nocturno en lugar de agravar los picos de demanda, aprovechando la capacidad de generación y de red que en esas horas permanece ociosa. La recarga nocturna gestionada convierte así lo que podría ser un problema para la red en un uso favorable, y constituye la hipótesis sobre la que se dimensiona la infraestructura en el presente trabajo.

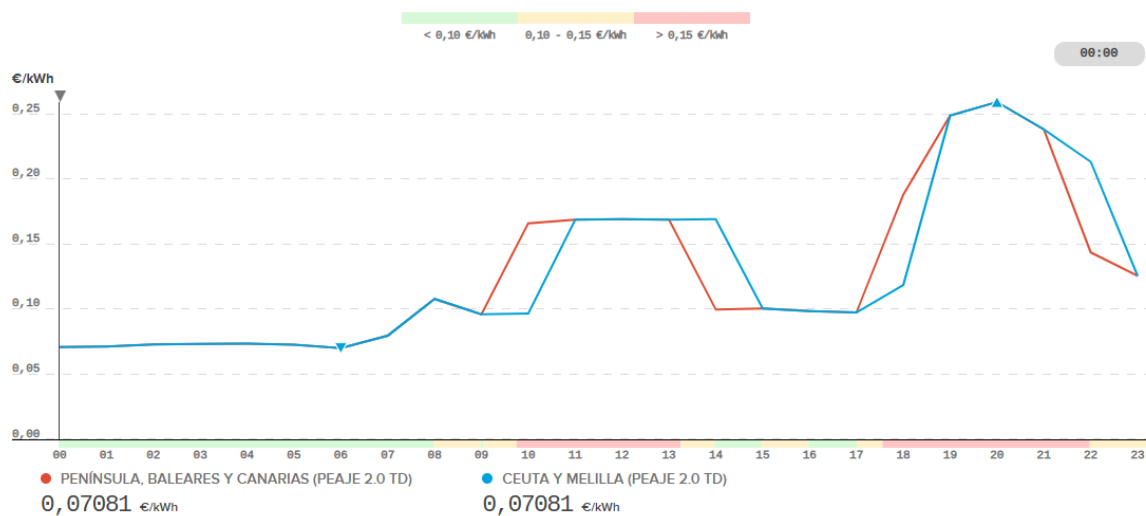


Figura 6: Precio de la electricidad en España (19/02/2026)– Fuente: Red Eléctrica

2.6 VIABILIDAD ECONÓMICA Y BARRERAS DE ADOPCIÓN

Las palancas descritas hasta aquí son técnicamente viables y cuentan con casos de éxito contrastados. Sin embargo, su despliegue efectivo no depende únicamente de que funcionen, sino de que resulten económicamente viables para quien debe adoptarlas. La transición de la última milla no la decide el ingeniero, sino el operador logístico, y este toma sus decisiones sobre criterios de coste. Comprender la estructura económica de esa decisión es, por tanto, imprescindible para valorar la viabilidad real de cualquier estrategia de descarbonización.

El coste total de propiedad

El instrumento habitual para evaluar esa decisión es el coste total de propiedad (TCO, *Total Cost of Ownership*), que agrega el conjunto de costes que un vehículo genera a lo largo de su vida útil, y no únicamente su precio de compra. Su utilidad reside precisamente en que corrige la intuición inmediata: comparar un vehículo eléctrico con uno diésel por su precio de catálogo conduce a una conclusión engañosa, porque ignora que ambos difieren de forma sustancial en lo que cuesta operarlos.

El TCO se articula en dos bloques de signo opuesto. Por un lado, el coste de adquisición, en el que el vehículo eléctrico parte en clara desventaja: su precio de compra es notablemente superior al de su equivalente de combustión, penalizado fundamentalmente por el coste de la batería, y a él debe sumarse la inversión en el punto de recarga que su operación exige. Por otro, los costes de operación, en los que la relación se invierte: el vehículo eléctrico consume una energía sensiblemente más barata por kilómetro y requiere menos mantenimiento, al carecer de motor de combustión, de cambios de aceite, de filtros y de sistema de escape, y al sufrir menor desgaste de frenos gracias a la frenada regenerativa.

La viabilidad económica de la electrificación se juega, en consecuencia, en el equilibrio entre ambos bloques: si el ahorro operativo acumulado llega a compensar el sobrecoste inicial, y en cuánto tiempo. Ese momento, conocido como punto de retorno o *payback*, es el indicador determinante para el operador, ya que marca el plazo durante el cual debe soportar una inversión sin recuperarla.

La fractura del sector

Este planteamiento, sin embargo, no afecta por igual a todos los actores del reparto urbano, y aquí reside una de las particularidades del sector. La última milla presenta una estructura marcadamente dual: junto a los grandes operadores corporativos, que gestionan flotas propias, opera una extensa red de pequeñas empresas subcontratadas y de transportistas autónomos sobre la que recae buena parte de la ejecución física de las entregas.

Ambos colectivos se enfrentan al mismo cálculo económico en condiciones muy distintas. El gran operador adquiere vehículos por volumen, accede a precios negociados, dispone de capacidad de financiación y puede amortizar la inversión en infraestructura sobre una flota numerosa. El transportista autónomo, en cambio, compra unidades sueltas al precio de mercado, opera con márgenes reducidos y debe financiar en solitario tanto el vehículo como su punto de recarga. Las propias organizaciones del sector han advertido de que imponer la

adquisición de vehículos eléctricos supone una carga inasumible para buena parte de las pymes y autónomos del transporte [12].

A esta barrera económica se superpone una barrera demográfica del parque. La edad media de los vehículos comerciales ligeros en España se sitúa en torno a los catorce años [13], lo que indica que el grueso de la herramienta de trabajo de este colectivo es muy anterior a la adopción comercial del vehículo eléctrico y que su ritmo de renovación es lento. Ambos factores se refuerzan mutuamente: quien no puede permitirse renovar, no renueva, y su flota envejece, alejándose progresivamente de los estándares de emisión exigidos.

Políticas de apoyo

Es precisamente esta asimetría la que justifica la intervención pública. Las ayudas a la adquisición, articuladas en España a través del Plan MOVES, actúan directamente sobre el término que decide el resultado del cálculo: reducen el sobre coste inicial y, con ello, adelantan el punto de retorno. Su eficacia deriva de que atacan la barrera real, la de la compra, y no la operación, donde el vehículo eléctrico ya es competitivo por sí mismo.

Junto a las ayudas económicas opera una segunda palanca, de naturaleza regulatoria: las zonas de bajas emisiones. Al restringir progresivamente el acceso de los vehículos más contaminantes al centro urbano, alteran el cálculo del operador introduciendo un coste que no aparece en ninguna partida contable, el de no poder prestar el servicio. En ese escenario, la renovación de la flota deja de ser una decisión de optimización económica para convertirse en una condición de permanencia en el mercado. La combinación de ambas palancas, el incentivo económico y la restricción normativa, constituye el marco en el que se está produciendo la transición de la última milla en las ciudades europeas.

2.7 CONCLUSIÓN Y RETOS

La revisión anterior permite extraer una conclusión clara: la descarbonización de la última milla no es un problema pendiente de invención tecnológica. Las soluciones existen, están maduras y han sido validadas en operación real. La electrificación funciona, como demuestran Londres y Berlín; la ruptura de carga funciona, como demuestran Gotemburgo y la propia Plaza Mayor de Madrid; la recarga nocturna en base es la práctica consolidada de las flotas profesionales; y el coste total de propiedad es un instrumento asentado para evaluar la decisión de inversión. El conocimiento disponible es, en ese sentido, considerable.

Lo que ese conocimiento no ofrece es una respuesta a la pregunta que efectivamente se plantea un decisor, sea el gestor público o el operador logístico, cuando debe actuar sobre una ciudad concreta. Y esa carencia se manifiesta en tres frentes.

El primero es la fragmentación del análisis. Cada palanca se ha estudiado y documentado por separado. Los casos de electrificación reportan reducciones de emisiones, pero no cuantifican la demanda energética que generan ni la infraestructura que exigen. Los proyectos de microhub describen su operativa, pero rara vez miden el coste que introduce la desconsolidación en términos de vehículos y de kilómetros adicionales. Los análisis de coste total de propiedad comparan vehículos aislados, al margen de la estrategia de flota en la que se insertan. Sin embargo, estas dimensiones no son independientes: la electrificación determina la demanda de energía, la demanda de energía determina la infraestructura de recarga, y ambas condicionan el coste que decide si la transición se produce. Un análisis que no las trate de forma integrada no puede sostener una decisión.

El segundo frente es la falta de anclaje temporal. La sustitución de una flota no es instantánea, sino que se produce a medida que los vehículos alcanzan el final de su vida útil. Ello significa que el ritmo de la descarbonización no depende únicamente de la tecnología elegida, sino de la estructura de edades del parque de partida y de la velocidad a la que este se renueve. Los estudios disponibles suelen comparar escenarios estáticos, un parque diésel frente a un parque eléctrico, sin modelar la trayectoria que conduce de uno a otro ni el tiempo que esa transición requiere. Existen, no obstante, metodologías consolidadas sobre las que apoyar ese análisis, como el inventario EMEP/EEA de factores de emisión, que permite asignar a cada vehículo las emisiones que le corresponden según su norma de homologación, y por tanto según su antigüedad [14]. Lo que no está desarrollado es su aplicación a la evolución temporal de la flota de última milla de una ciudad concreta.

El tercer frente es la ausencia de particularización a Madrid. Los casos de referencia europeos son valiosos, pero no son directamente extrapolables. Madrid presenta condicionantes propios: una estructura de flota fuertemente fragmentada, con un peso muy elevado del transportista autónomo y de la subcontratación; un canal HORECA de gran volumen, con las exigencias de cadena de frío que ello comporta; una red de aparcamientos subterráneos que ofrece una oportunidad singular, pero también una restricción física, para la implantación de microhubs; y un marco normativo propio, la estrategia Madrid 360, con sus zonas de bajas emisiones. Ninguno de los casos revisados responde a esta combinación de condiciones.

De estas tres carencias nace el presente trabajo. Su propósito no es proponer una tecnología nueva, sino cuantificar de forma integrada, para la ciudad de Madrid y sobre un horizonte

temporal explícito, qué consiguen realmente las estrategias disponibles y cuánto cuestan. Para ello se construye un modelo de simulación que parte de una caracterización detallada de la flota real de última milla, incluida su distribución de antigüedad, y proyecta su evolución bajo distintas estrategias de descarbonización, evaluando simultáneamente cuatro dimensiones: las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes locales, la demanda de energía eléctrica, la infraestructura de recarga necesaria para sostenerla y el coste total de propiedad que decide su viabilidad.

Las tres palancas revisadas en este capítulo se convierten así en las tres estrategias que el modelo evalúa: la velocidad de renovación del parque, la tecnología con la que se sustituyen los vehículos retirados y la reorganización logística mediante microhubs. El resultado buscado no es una recomendación genérica, sino un conjunto de cifras que permitan responder a preguntas concretas: cuánto se reduce cada contaminante con cada estrategia, dónde están sus límites, qué potencia eléctrica hace falta, cuántos microhubs serían necesarios y en cuántos años se recupera la inversión.

Capítulo 3. ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA FLOTA DE VEHÍCULOS

Todo modelo de simulación es tan bueno como los datos que lo alimentan. Antes de proyectar cómo evolucionará la flota de reparto de Madrid bajo distintas estrategias de descarbonización, es necesario responder a una pregunta previa y nada trivial: qué flota es esa exactamente. Este capítulo construye ese punto de partida, y lo hace en tres planos que el modelo necesita conocer para funcionar.

El primero es qué vehículos componen la flota y en qué proporción: cuántos son furgones y cuántas motocicletas, qué peso tiene cada tecnología de propulsión y, sobre todo, qué antigüedad arrastran, dado que en un modelo de renovación la edad de cada vehículo determina cuándo se jubila y qué norma de emisión le corresponde. El segundo es cuándo y cuánto circulan: la ventana horaria en la que se concentra el reparto, que fija tanto el kilometraje diario de cada vehículo como el tiempo que la flota permanece estacionada y, por tanto, disponible para recargar. El tercero es cómo se comporta cada vehículo: su consumo, su capacidad de batería y autonomía en el caso de los eléctricos, y los factores con los que emite dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas.

Conviene advertir desde ahora de la principal dificultad de esta tarea. No existe un censo público que cuantifique la flota de última milla de Madrid, pues sus flujos se contabilizan a través de fuentes distintas y no consolidadas: la paquetería a particulares figura en las estadísticas del sector postal, mientras que el abastecimiento comercial pertenece al transporte de mercancías. La flota de referencia que aquí se construye es, en consecuencia, una flota representativa: su composición relativa y sus parámetros técnicos se apoyan en fuentes contrastadas, pero su tamaño absoluto es un parámetro de escala, adoptado por conveniencia y no obtenido de un recuento real. Esta elección, cuyas implicaciones se discuten en el capítulo de conclusiones, condiciona la lectura de todos los resultados absolutos del trabajo, pero no la de los relativos, que son independientes del tamaño del parque.

3.1 *REPARTO DE PAQUETERÍA (B2C)*

Para comprender el impacto real de la logística de paquetería B2C en el tráfico y las emisiones de la ciudad de Madrid, resulta fundamental diferenciar entre la gestión comercial del envío y su ejecución operativa. En otras palabras, hay que distinguir entre el operador logístico que se contrata para realizar el envío y el propietario físico del vehículo que efectúa la entrega. Esta distinción es importante porque, al analizar los vehículos empleados en el reparto, no puede asumirse que todos los envíos gestionados por una empresa (por ejemplo, Amazon) los realice esa misma compañía con su propia flota. En realidad, una parte de ellos corre a cargo de autónomos subcontratados que operan con una flota completamente distinta de la de Amazon.

3.1.1 EL MAPA COMERCIAL: OPERADORES TRADICIONALES Y LA INTEGRACIÓN VERTICAL

El volumen de la paquetería B2C ha crecido de forma ininterrumpida en los últimos años, impulsado por el comercio electrónico. Según el último Panel de Hogares de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), dentro del ecosistema de operadores logísticos tradicionales, aquellos cuya actividad se basa en distribuir mercancía generada por terceros, el Grupo Correos lidera el reparto de paquetería de comercio electrónico: fue el operador que entregó el último paquete al 29,4 % de los compradores online. Le siguen los principales operadores privados: SEUR, con un 12,2 %; MRW, con un 8,6 %; y DHL, con un 8,4 % [15].

Frente a este modelo se encuentra el de integración vertical, liderado por las grandes plataformas de venta online. El caso más destacado es Amazon, la tienda en la que el 49,5 % de los compradores online realizó su última compra [15]. Lejos de limitarse a subcontratar mensajerías tradicionales, la plataforma ha desarrollado su propia red de reparto (Amazon Logistics), que la CNMC clasifica dentro de la tipología de operadores de "última milla". En 2024, esta categoría se consolidó como la segunda por volumen de envíos del segmento de mensajería y paquetería (CEP), con un 33 % del total, solo por detrás de las redes de transporte urgente (39 %) y por delante del operador público (17,5 %) [16]. Estos datos reflejan el peso que las plataformas de integración vertical, como Amazon, han alcanzado en el reparto de última milla.

3.1.2 LA REALIDAD OPERATIVA: EL PESO DE LA SUBCONTRATACIÓN Y LOS AUTÓNOMOS

A pesar de la elevada concentración de la cuota de mercado en estas grandes marcas corporativas, la realidad a pie de calle presenta una estructura altamente fragmentada. Aunque los paquetes viajen bajo los sistemas informáticos y las etiquetas de marcas como SEUR o Amazon Logistics, la ejecución física de la denominada "última milla" descansa de forma masiva sobre una red de subcontratación. En el caso de Amazon, esta etapa final recae sobre una extensa red de pymes asociadas, los denominados Delivery Service Partner (DSP): emprendedores que crean su propia empresa de reparto para distribuir los paquetes de la plataforma [17].

Según el Informe Anual del Sector Postal de la CNMC, el ecosistema logístico español se sustenta estructuralmente en redes de franquicias, empresas colaboradoras y, de forma creciente, en trabajadores autónomos [16]. Los registros oficiales revelan que, de las miles de empresas inscritas en el registro postal para responder a la creciente demanda, los transportistas autónomos independientes se han convertido en la figura más habitual: en 2024 superaban los 2.200 inscritos, lo que representa el 50,9 % de los operadores postales, frente al 39,1 % del año anterior [16].

Esta dualidad entre marca comercial y operador físico constituye la principal barrera económica para la descarbonización. Mientras que las flotas corporativas, propiedad directa de los grandes operadores, están inmersas en la transición hacia furgonetas eléctricas, el transportista autónomo subcontratado opera con márgenes de beneficio muy reducidos. En consecuencia, este colectivo carece en la mayoría de los casos del músculo financiero necesario para asumir el elevado Coste Total de Propiedad (TCO) inicial de un vehículo eléctrico o para instalar la infraestructura de recarga privada asociada.

3.1.3 COMPOSICIÓN TÉCNICA DE LA FLOTA B2C

Para el dimensionamiento y la posterior modelización matemática de la red de *microhubs*, el presente proyecto establece una hipótesis de diseño fundamental: se asume una correspondencia directa entre la cuota de mercado de envíos de cada operador y su representación en la flota total que circula por la ciudad. Esta equivalencia permite construir un parque móvil ponderado y representativo de la realidad tecnológica de cada operador. No obstante, conviene precisar que se trata de una simplificación: ante la ausencia de un censo público de la flota real por operador, se asume que la cuota de envíos se traduce proporcionalmente en cuota de vehículos, aun cuando cada tipología (una moto frente a un furgón) presenta una productividad de reparto distinta.

Bajo esta premisa, la caracterización de los vehículos (100% de la flota B2C) se divide proporcionalmente:

Flota del Grupo Correos (30%): Se asigna este porcentaje en correspondencia con su cuota de reparto de paquetería de comercio electrónico (29,4 % según la CNMC [15]). Esta porción de la flota está fuertemente marcada por la electrificación y la micro movilidad. Según los últimos datos corporativos, cerca del 25 % de la flota de reparto de Correos está ya compuesta por vehículos sostenibles, más de 4.000 unidades entre eléctricos, híbridos enchufables y de gas natural comprimido (GNC), entre los que destacan más de 2.500 motocicletas eléctricas y más de 900 furgonetas 100 % eléctricas de volumen reducido, estandarizadas en modelos de 4 m³ como la Renault Kangoo E-Tech [18]. Dado el peso reducido de los híbridos y de GNC, en la modelización se asimila la totalidad de ese 25 % a vehículos eléctricos; esta simplificación sobrestima ligeramente la electrificación de partida, aunque en un sentido conservador, ya que reduce el margen de mejora atribuible a la transición. Aplicando la proporción real entre motocicletas y furgonetas eléctricas (en torno a 2.500:900), ese 25 % se traduce en un 18 % de motos eléctricas y un 7 % de furgonetas eléctricas de volumen reducido (4 m³).

El 75 % restante corresponde a vehículos de combustión. Asumiendo que este parque conserva una estructura similar a la del eléctrico, dominada por las motocicletas, como refleja la propia proporción 2.500:900 entre motos y furgonetas eléctricas[18], se establece como hipótesis de diseño un 45 % de motocicletas de combustión (gasolina) destinadas a paquetería ligera. El 30 % restante, de vehículos comerciales diésel, se reparte, también como estimación, en un 20 % de furgonetas ligeras (carga útil en torno a 600 kg, formato L1H1) para el reparto capilar urbano estándar y un 10 % de furgones de alta capacidad (carga útil superior a 1.200 kg, formato L2H2) destinados a paquetería voluminosa.

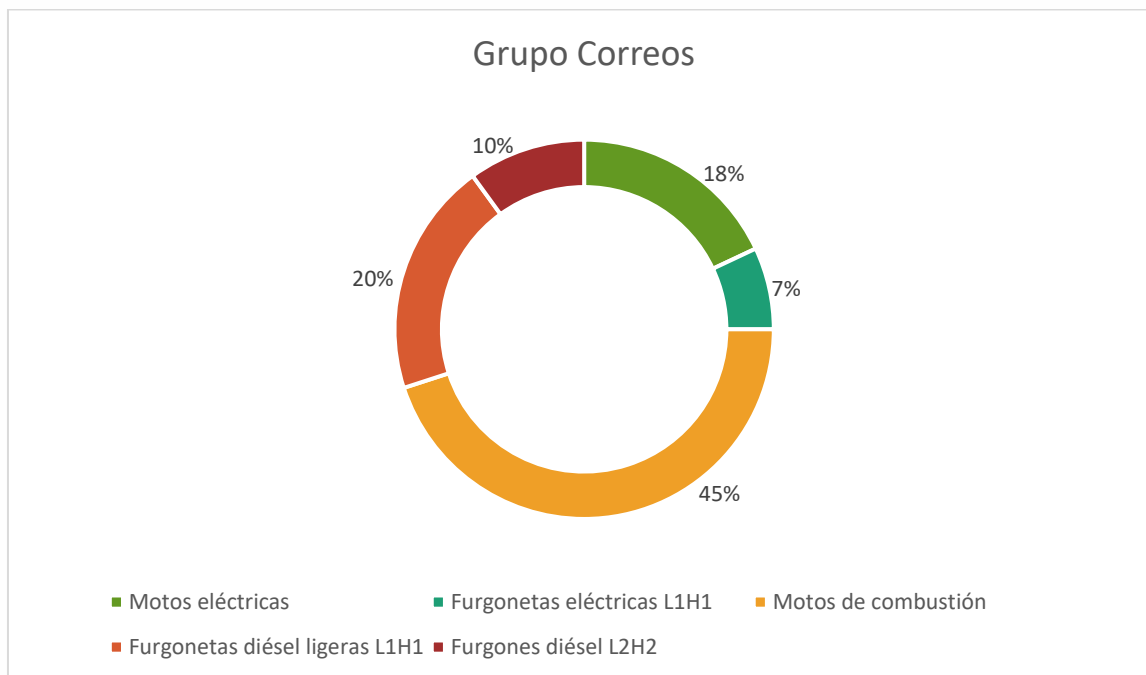


Figura 7: Flota del Grupo Correos - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

Flota de grandes operadores privados: SEUR, MRW, DHL (30%): Este bloque agrupa la cuota conjunta de reparto de paquetería de comercio electrónico de los principales competidores históricos (SEUR (12,2 %), MRW (8,6 %) y DHL (8,4 %)), que suman un 29,2 % [15]. A diferencia de la estrategia basada en la micro movilidad de Correos, estos operadores reparten volúmenes mayores y requieren vehículos de más capacidad volumétrica.

Para estimar su grado de electrificación, se toma como referencia el dato más representativo y específico disponible: SEUR declara que el 20 % de su flota de última milla en España está ya electrificada [19]. DHL avanza en la misma dirección, con la incorporación de furgonetas eléctricas y el objetivo de alcanzar el 75 % de su flota urbana de cero emisiones en 2030 [20]. Para sus entregas en las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE), ambas compañías han estandarizado sus adquisiciones en torno a furgones eléctricos de gran volumen, destacando el Ford E-Transit [20], [21].

Por consiguiente, se modeliza este grupo como un parque mixto: un 20 % de furgones 100% eléctricos de alta capacidad (Ford E-Transit) y un 80 % de vehículos comerciales diésel. El 20 % eléctrico se asimila íntegramente a vehículos de cero emisiones; dado que las cifras corporativas de "flota electrificada" incluyen algunos híbridos enchufables, esta asignación sobrestima ligeramente, de forma conservadora, la electrificación de partida, en coherencia con el criterio adoptado para el Grupo Correos.

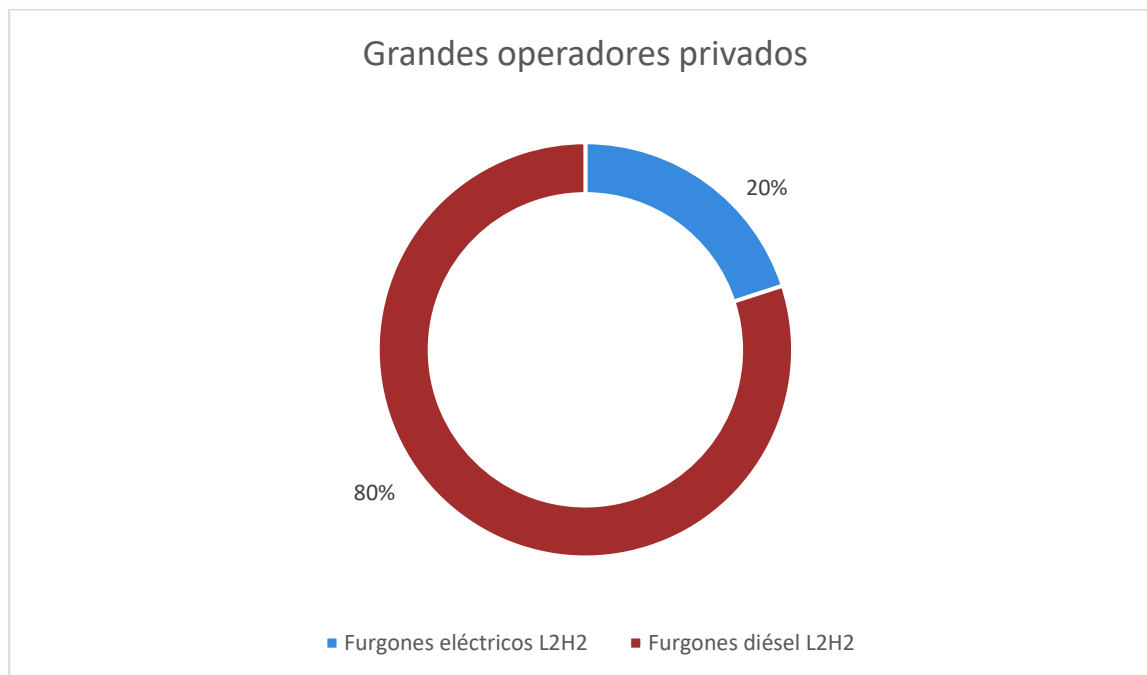


Figura 8: Flota de los grandes operadores privados - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

- **Flota corporativa de Amazon Logistics (15%):** Aunque Amazon es uno de los principales operadores del país, actualmente su ejecución física está fuertemente externalizada. Por ello se le asigna un 15 %, una cuota conservadora que representa su flota "puramente corporativa", vehículos estandarizados operados por sus Delivery Service Partners, mientras que el volumen subcontratado queda recogido en el grupo de autónomos. Dado que la compañía no publica su cuota local de electrificación, se establece una hipótesis de diseño a partir de sus incorporaciones masivas de flota y de la normativa urbana. A nivel global, Amazon opera bajo el marco The Climate Pledge, con el compromiso de alcanzar las cero emisiones netas de carbono en 2040 [22]. Esta política se materializa a escala local con despliegues como la reciente incorporación a su red española de más de 300 furgonetas 100 % eléctricas del grupo Stellantis (Peugeot e-Expert, Citroën ë-Jumpy, Opel Vivaro-e y Fiat e-Scudo), que operan en grandes núcleos urbanos como Madrid [22]. Por criterios de eficiencia logística, esta flota eléctrica no se dispersa por todo el país, sino que se concentra de forma intensiva en las ciudades con Zonas de Bajas Emisiones (ZBE). Sobre esta base, y asumiéndolo como hipótesis de diseño optimista, se modeliza el 60 % de esta cuota corporativa con furgonetas 100 % eléctricas (modelos Stellantis como el Peugeot e-Expert, asimilados por su tamaño al formato L1H1) y el 40 % restante con furgones comerciales diésel de alta capacidad (L2H2).

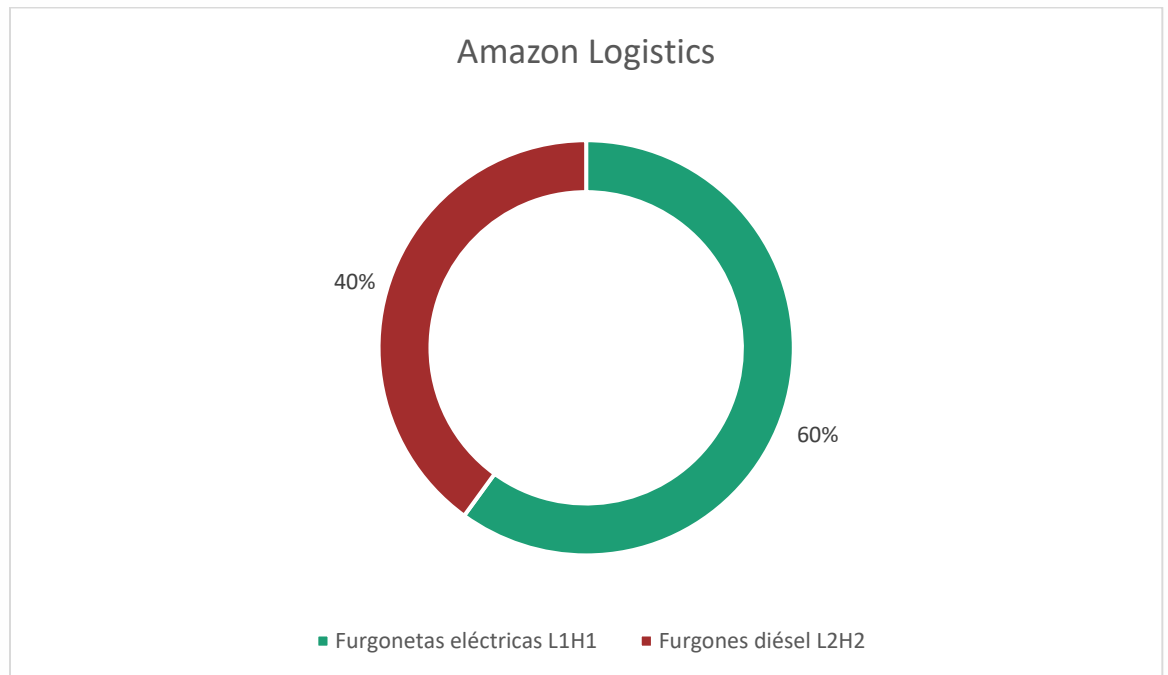


Figura 9: Flota de Amazon Logistics - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

- **Flota de transportistas autónomos y subcontratas (25%):** Este segmento cierra el modelo absorbiendo el volumen físico de entregas que las plataformas externalizan. A diferencia de las flotas corporativas, la descarbonización de este colectivo se encuentra frenada por una doble barrera estructural. Por un lado, la barrera económica: organizaciones empresariales como UNO, la Organización Empresarial de Logística y Transporte, advierten de que imponer la compra de furgonetas eléctricas supone una inversión inasumible para buena parte de las pymes y autónomos del sector [12]. Por otro lado, la barrera demográfica del parque móvil: según el informe de antigüedad del parque elaborado por la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), la edad media de los vehículos comerciales ligeros en España se sitúa en 14,4 años [13]. Esto indica que el grueso de los vehículos de este colectivo es anterior a la adopción comercial del vehículo eléctrico. Por consiguiente, y como hipótesis de diseño, esta porción del 25 % se modeliza en su totalidad como furgones diésel de combustión interna en configuración L2H2, formato representativo del reparto subcontratado de paquetería voluminosa.

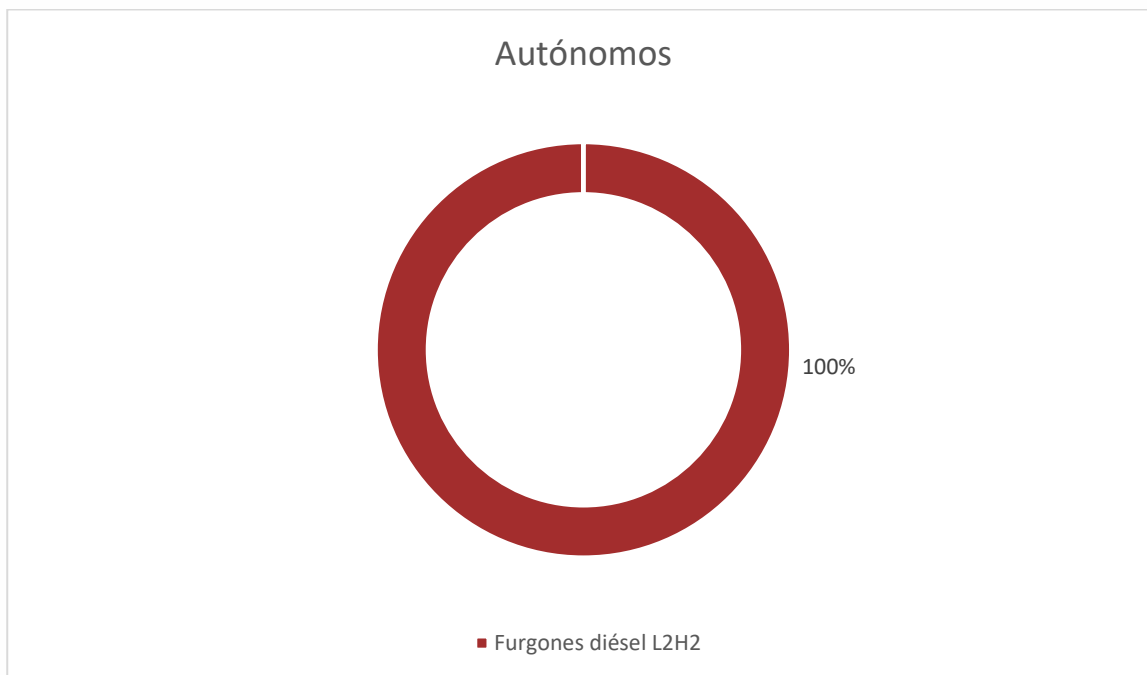


Figura 10: Flota de autónomos - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

La integración ponderada de estos cuatro perfiles (Grupo Correos (30%), grandes operadores privados (30%), Amazon Logistics (15%) y autónomos y subcontratas (25%)) define la Flota Arquetipo Mixta B2C del proyecto. La Tabla 3 recoge la composición de cada grupo junto con el resultado agregado, mientras que la Figura 12 representa gráficamente la distribución final por tipo de vehículo. El resultado refleja con claridad el punto de partida del segmento: pese a la electrificación de las flotas corporativas, el 77,5 % del parque sigue siendo de combustión, dominado por los furgones diésel de alta capacidad L2H2 (58 %), frente a un 22,5 % ya electrificado. Esta flota arquetipo constituye la base sobre la que se asignarán los parámetros técnicos de consumo, volumen y autonomía en el capítulo de caracterización, necesarios para cuantificar las emisiones de partida y dimensionar la infraestructura de recarga.

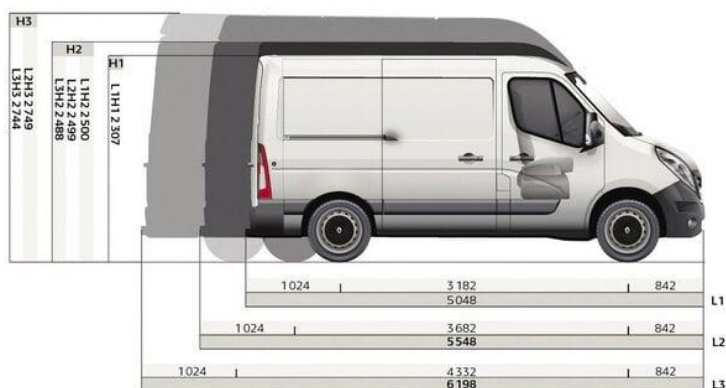


Figura 11: Comparativa de tamaños de furgones - Fuente: Camperizando

Tabla 3: Flota de referencia B2C – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

Tipo de vehículo		Correos (30%)	Privados (30%)	Amazon (15%)	Autónomos (25%)	Flota de referencia B2C
	Motos eléctricas	18%	-	-	-	5,4%
	Furgonetas eléctricas L1H1	7%	-	60%	-	11,1%
	Furgones eléctricos L2H2	-	20%	-	-	6,0%
	Motos de combustión	45%	-	-	-	13,5%
	Furgonetas diésel L1H1	20%	-	-	-	6,0%
	Furgones diésel L2H2	10%	80%	40%	100%	58,0%

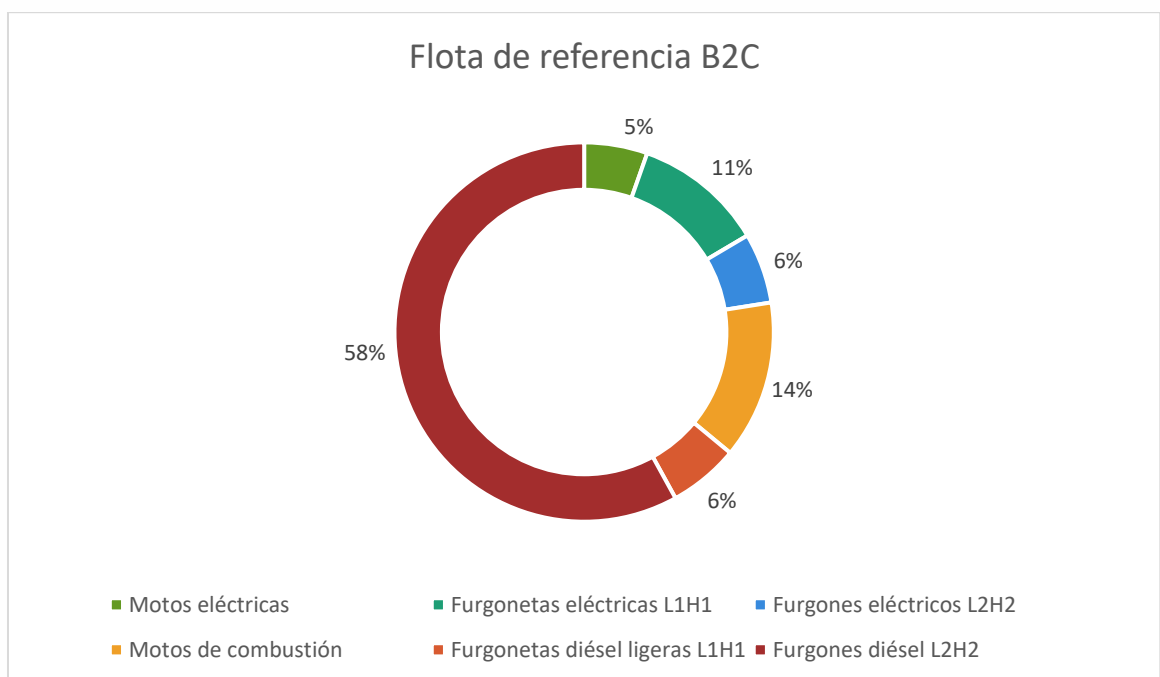


Figura 12: Flota de referencia B2C – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

3.2 FLOTA B2B

El segmento comercial y empresarial de la Distribución Urbana de Mercancías (DUM) conforma el bloque más pesado y complejo del tráfico urbano. Para realizar un diagnóstico riguroso de su impacto ambiental y operativo en la ciudad de Madrid es necesario analizar el espectro completo de entregas a negocios, que abarca exigencias logísticas diametralmente opuestas: desde el suministro de material de oficina hasta el abastecimiento en cadena de frío de la hostelería.

La electrificación de este segmento, además, se enfrenta a barreras estructurales más severas que las del reparto de última milla ligera, derivadas del peso de la mercancía, el gálibo de los chasis y la demanda energética de equipos auxiliares como los sistemas de refrigeración. A partir de la Monografía de la Distribución Urbana del Observatorio de la Movilidad Metropolitana [23], complementada, para el segmento de paquetería empresarial, con los datos sectoriales de la CNMC [16], el parque móvil empresarial se dimensiona internamente en los siguientes bloques:

- **Canal HORECA y alimentación (65%):** Este segmento concentra la mayor carga física de la distribución urbana y exige vehículos de alta capacidad (con una masa máxima autorizada, MMA, de entre 3.500 y 16.000 kg). Su principal restricción técnica para la descarbonización es la necesidad de mantener la cadena de frío, que obliga a alimentar de forma continua los equipos de refrigeración y eleva la demanda energética del vehículo.

Ante la ausencia de un censo oficial público que desglose el parque móvil, el presente proyecto recurre a una estimación basada en la estructura de aprovisionamiento del sector hostelero. Según el estudio de hábitos de aprovisionamiento en HORECA del Ministerio de Agricultura [24], las bebidas y los productos secos, de transporte a temperatura ambiente, concentran la mayor parte del gasto, mientras que los productos frescos representan en torno al 25 %. Tomando esta proporción como referencia, el modelo asume como hipótesis de diseño que un 25 % de la flota corresponde a vehículos con equipo de frío, destinados a la mercancía que requiere cadena de frío, y el 75 % restante a vehículos de carga seca y bebidas a temperatura ambiente, y se estructura de la siguiente manera:

1. Vehículos Diésel con equipo de frío (25%): furgones y camiones frigoríficos que dependen íntegramente del motor de combustión interna, tanto para la tracción como para la refrigeración ininterrumpida de la caja. El bloque se divide en furgones frigoríficos (hasta 3.500 kg de MMA), que representan un 18 %, y camiones rígidos frigoríficos (entre 3.500 y 16.000 kg de MMA), que suponen el 7 % restante. Esta división refleja el predominio de los vehículos ligeros frente a los pesados en el reparto urbano [23].
2. Vehículos Diésel de carga seca (70%): flota destinada al transporte de bebidas a temperatura ambiente (botelleros) y alimentación seca, operada mediante furgones ligeros y camiones rígidos tradicionales, que representan un 52 % y un 18 % respectivamente. Como en el bloque anterior, este reparto refleja el predominio de los vehículos ligeros frente a los pesados en el reparto urbano [23].
3. Flota 100% Eléctrica (5%): cuota residual que recoge los proyectos de distribución sostenible desplegados por las grandes distribuidoras del sector. En Madrid, el referente es el servicio Voldis Express de Mahou San Miguel,

que reparte a la hostelería desde un hub urbano con vehículos eléctricos de capacidad reducida [25]; este modelo de hub más micro distribución eléctrica se repite en otras ciudades con operadores como Heineken España, que emplea vehículos eléctricos ligeros diseñados específicamente para el transporte de barriles y cajas [26], o Coca-Cola Europacific Partners, que ha incorporado camiones pesados 100 % eléctricos a su distribución [27]. A partir de este patrón, el bloque se modeliza en dos tipologías: un 4 % de vehículos eléctricos ligeros de micro distribución (tipo Scoobic, concebidos para el reparto de barriles y cajas en el tramo final desde los hubs urbanos) y un 1 % de camiones eléctricos pesados (16 t, tipo Renault Trucks D E-Tech), única alternativa de cero emisiones disponible hoy para la distribución pesada.

Canal HORECA y Alimentación

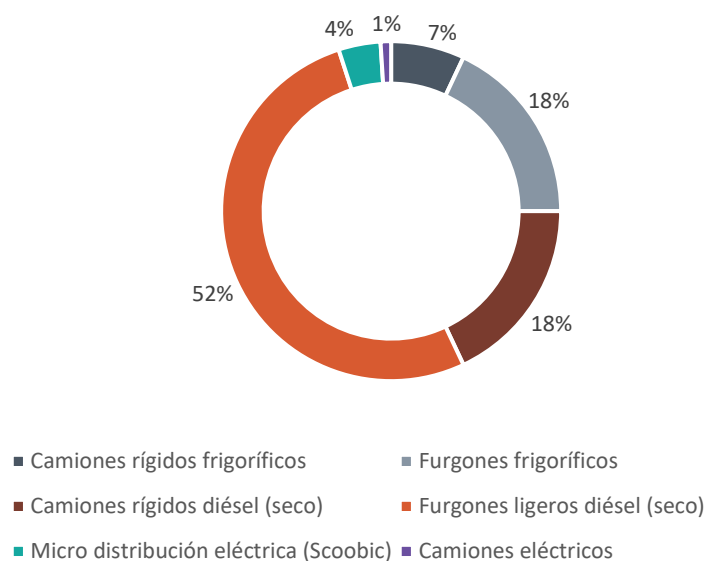


Figura 13: Flota del canal HORECA y alimentación – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

- **Paquetería Empresarial y Retail (35%):** Este bloque engloba el suministro interempresarial de mercancía seca, operado por integradoras globales (DHL, UPS) y grandes redes nacionales (SEUR, MRW). Aunque no soporta la penalización energética de la cadena de frío, el volumen de la mercancía industrial paletizada exige predominantemente furgones de gran volumen (configuración L2H2). En cuanto a su electrificación, estos operadores avanzan de forma más conservadora que en la última milla ligera, donde alcanzan en torno a un 20 % de flota eléctrica [19] [20]. Su composición tecnológica se define así:
 1. Furgonetas de gran volumen diésel (85%): vehículos comerciales de combustión interna que constituyen la mayor parte de este segmento, en línea con el predominio de los vehículos comerciales diésel en el reparto urbano[23].
 2. Furgones de gran volumen 100% eléctricos (15%): flota de cero emisiones, estandarizada en modelos como el Ford E-Transit o el Mercedes-Benz eSprinter,

destinada a la penetración en el distrito centro y las zonas de bajas emisiones. Se fija en un 15 %, por debajo del ~20 % que estos operadores alcanzan en su última milla ligera [19] [20], como estimación conservadora que refleja la electrificación más lenta de la mercancía paletizada pesada.

Esta segmentación porcentual completa el perfil tecnológico de la DUM en Madrid, permitiendo establecer las bases paramétricas para el futuro cálculo de emisiones.

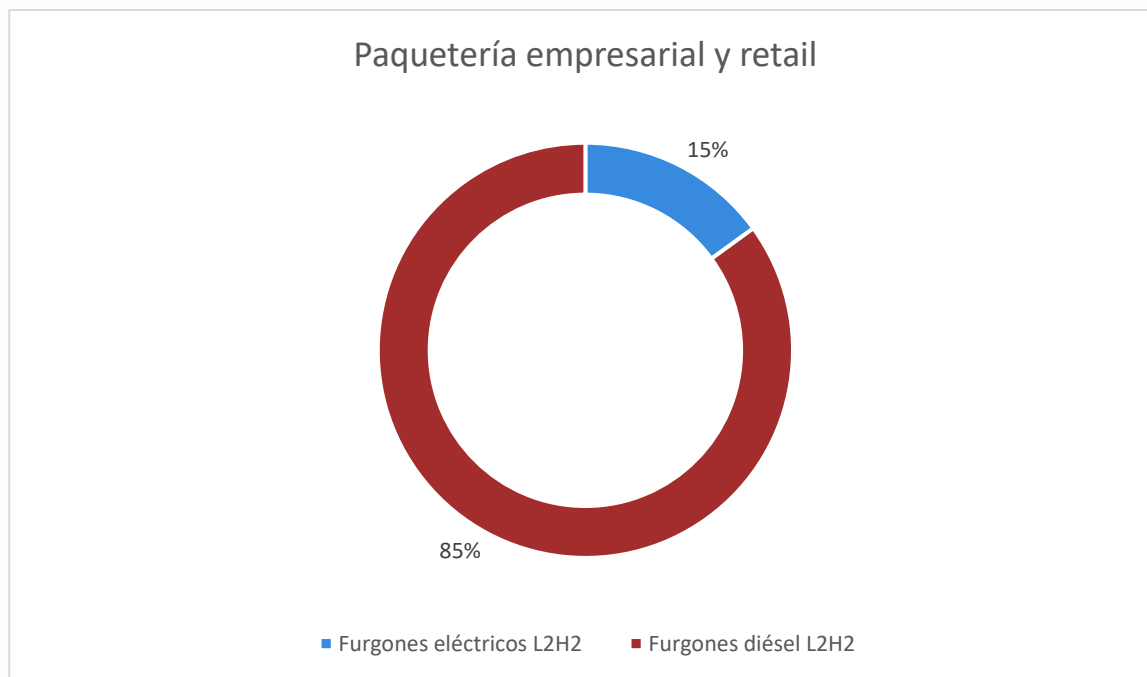


Figura 14: Flota de paquetería empresarial y retail – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

La integración de los dos subgrupos analizados (el canal HORECA y alimentación (65 %) y la paquetería empresarial CEP-B2B (35 %)), ponderados según su peso dentro del bloque, define la flota de referencia B2B del proyecto. La Tabla 4 recoge este cálculo, con la composición interna de cada subgrupo y el porcentaje ponderado resultante por tipo de vehículo, y la Figura 15 lo representa gráficamente. El resultado confirma el carácter todavía marcadamente diésel de la distribución comercial: los furgones L2H2 de combustión concentran cerca de dos tercios del parque y, en conjunto, los vehículos diésel suponen un 91,5 % de la flota, frente a apenas un 8,5 % de vehículos eléctricos. Esta electrificación tan reducida, muy por debajo del 22,5 % del segmento B2C, evidencia las barreras estructurales del transporte pesado y de la cadena de frío, y constituye el punto de partida para dimensionar el reto de descarbonización de este bloque.

Tabla 4: Flota de referencia B2B – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

Tipo de vehículo		HORECA (65%)	Paquetería empresarial (35%)	Flota de referencia B2B
	Furgones eléctricos L2H2	-	15%	5,25%
	Micro distribución eléctrica (Scoobic)	4%	-	2,60%
	Camiones eléctricos (16t)	1%	-	0,65%
	Furgones diésel L2H2	52%	85%	63,55%
	Furgones frigoríficos diésel	18%	-	11,70%
	Camiones diésel rígidos	18%	-	11,70%
	Camiones frigoríficos diésel rígidos	7%	-	4,55%

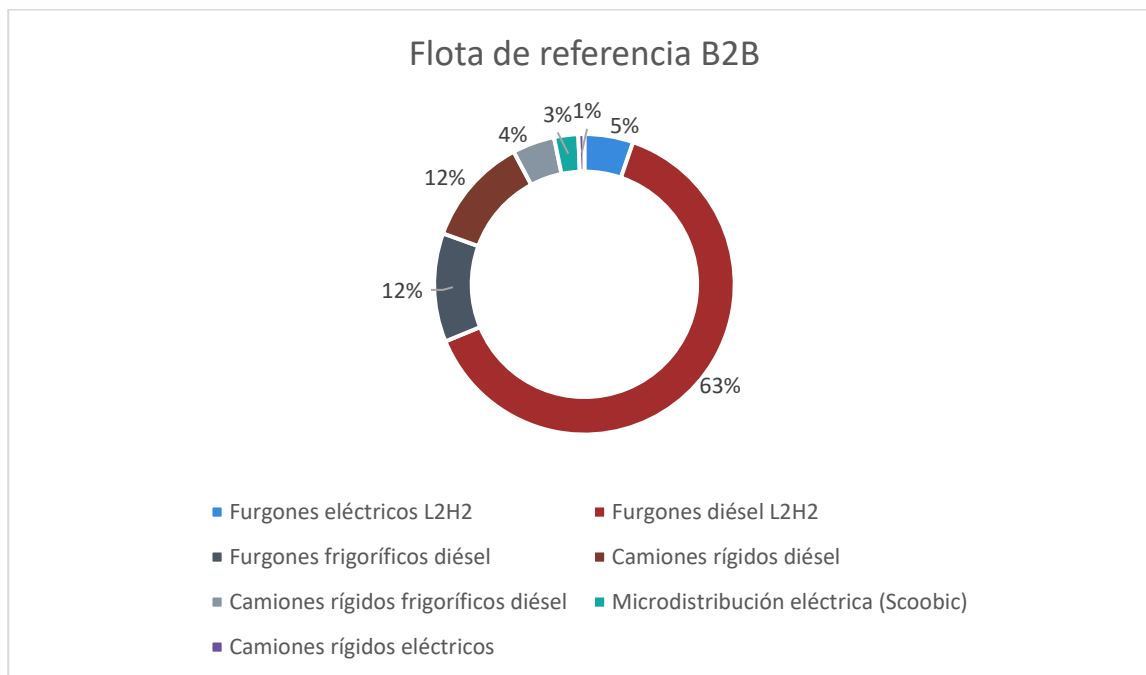


Figura 15: Flota de referencia B2B – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

3.3 FLOTA TOTAL DE ÚLTIMA MILLA

Una vez caracterizados de forma independiente los dos grandes bloques operativos: el reparto de paquetería B2C y la distribución comercial B2B, este apartado los integra en una única flota de referencia que representa el conjunto de la última milla de la ciudad de Madrid. La agregación se realiza ponderando cada bloque según el peso fijado en la hipótesis de diseño inicial: un 35 % para el segmento B2C y un 65 % para el B2B. La Tabla 5 recoge el cálculo completo, con la aportación de cada bloque y el porcentaje resultante por tipo de vehículo, y la Figura 16 representa la composición global. Para construir esta flota agregada, los tipos comunes a ambos bloques se han unificado en una sola categoría, dado que el objeto de estudio es el tipo de vehículo y no la mercancía que transporta.

El resultado dibuja una flota de última milla todavía fuertemente dependiente del motor de combustión: los vehículos diésel representan el 86,6 % del parque, frente a un 13,4 % de flota eléctrica. Dentro del conjunto, el furgón diésel de gran volumen (L2H2) es, con diferencia, el vehículo predominante, al concentrar en torno al 62 % de toda la flota. Esta composición constituye la línea base del modelo: el escenario de partida sobre el que se simularán, en los capítulos siguientes, las distintas estrategias de electrificación y reorganización logística orientadas a la descarbonización de la última milla.

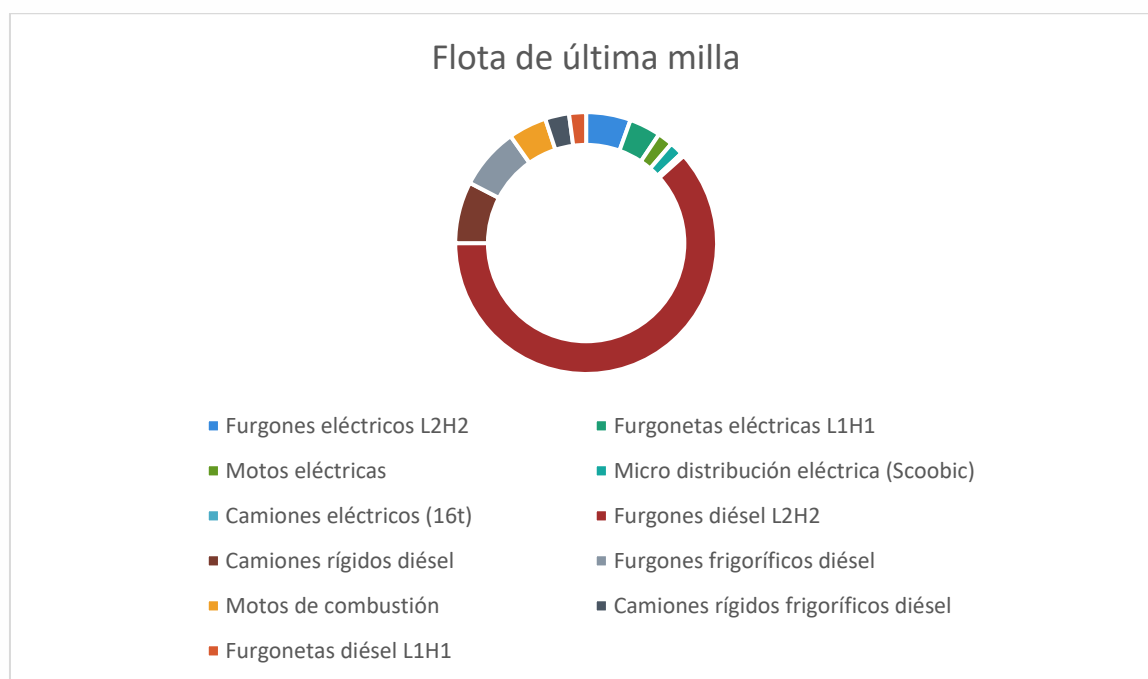


Figura 16: Flota de última milla – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

Tabla 5: Flota de última milla – Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

Tipo de vehículo		B2C (35%)	B2B (65%)	Flota de última milla
	Furgones eléctricos L2H2	6,0%	5,25%	5,51%
	Furgonetas eléctricas L1H1	11,1%	-	3,89%
	Motos eléctricas	5,4%	-	1,89%
	Micro distribución eléctrica (Scoobic)	-	2,60%	1,69%
	Camiones eléctricos (16t)	-	0,65%	0,42%
	Furgones diésel L2H2	58,0%	63,55%	61,59%
	Camiones rígidos diésel	-	11,70%	7,61%
	Furgones frigoríficos diésel	-	11,70%	7,61%
	Motos de combustión	13,5%	-	4,73%
	Camiones rígidos frigoríficos diésel	-	4,55%	2,96%
	Furgonetas diésel L1H1	6,0%	-	2,10%

3.4 ANTIGÜEDAD DE LA FLOTA

Los apartados anteriores han caracterizado la flota de última milla por tipo de vehículo y tecnología de propulsión. Para completar la fotografía del parque de partida queda una última dimensión: su antigüedad. La edad de los vehículos es un parámetro determinante del modelo por dos motivos. En primer lugar, condiciona las emisiones de contaminantes locales, ya que la norma de homologación (Euro) con la que se matriculó cada vehículo depende de su año de fabricación, y un vehículo antiguo puede emitir varias veces más NO_x y partículas que uno reciente del mismo tipo. En segundo lugar, determina el ritmo al que el parque puede renovarse, pues la sustitución se produce a medida que los vehículos alcanzan el final de su vida útil. Por ambas razones, la simulación no puede tratar la flota como un conjunto de vehículos idénticos y nuevos, sino que debe partir de su distribución real de edades.

Aplicar una única edad media a todo el parque ocultaría, sin embargo, una realidad que el propio análisis del apartado 3.1 puso de manifiesto: la antigüedad del reparto de última milla es marcadamente bimodal. La edad media nacional es en realidad el promedio de dos poblaciones muy distintas. Por un lado, las flotas corporativas de los grandes operadores, que renuevan sus vehículos en ciclos cortos por razones fiscales, de mantenimiento y de imagen, y mantienen un parque joven. Por otro, los transportistas autónomos y subcontratas que, como se expuso en el apartado 3.1.2, operan con márgenes reducidos y carecen del músculo financiero para renovar, arrastrando la cola de vehículos viejos que eleva la media del sector. Asignar una edad única a todos por igual sobrestimaría la antigüedad de las flotas corporativas y subestimaría la de los autónomos, difuminando precisamente el contraste que explica cómo se reparten las emisiones.

La caracterización de la antigüedad se apoya en dos fuentes. Para el parque envejecido se toma el informe de IDEAUTO publicado por ANFAC [13], que sitúa la edad media de los vehículos comerciales ligeros en 14,4 años y aporta la proporción de vehículos por encima de la media, cercana al 50 %. Para el parque corporativo se recurre a los datos de la Asociación Española de Renting de Vehículos (AER), según la cual la cadencia de renovación de las flotas gestionadas se sitúa en torno a los cuatro años, con una edad media del parque en renting de apenas dos años [28]. Estos dos anclajes permiten dimensionar con respaldo las dos poblaciones.

Sobre esta base, el modelo diferencia tres perfiles de antigüedad. El perfil corporativo agrupa los vehículos de las grandes operadoras: las cuotas de Correos, de los operadores privados y de Amazon en el segmento B2C, la totalidad de la paquetería empresarial y la mayor parte del canal HORECA. Se modeliza como una flota joven, con el grueso por debajo de los cinco años y una cola limitada de vehículos que se conservan algo más allá del ciclo de renovación, lo que da una edad media próxima a los cuatro años. El perfil envejecido recoge la antigüedad real del segmento subcontratado: los furgones diésel de los transportistas autónomos y una fracción del canal HORECA correspondiente a los pequeños distribuidores locales, a los que se aplica la distribución de envejecimiento que ANFAC reporta para los comerciales ligeros, con su característica cola de vehículos de más de quince y veinte años. Por último, los vehículos 100 % eléctricos constituyen una flota reciente, fruto de los despliegues corporativos de los últimos años (2021-2025), a la que se asigna una antigüedad

de entre cero y cinco años. La Tabla 6 recoge las distribuciones por bandas de antigüedad de los dos perfiles de combustión.

Tabla 6: Distribución de antigüedad por perfil de flota - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas

Banda de antigüedad	Perfil corporativo	Perfil envejecido
Menos de 5 años	75%	15%
5 -10 años	20%	17%
10 – 15 años	5%	20%
15 – 20 años	-	24%
Más de 20 años	-	24%

Dentro de cada banda se asume un reparto uniforme entre las edades que la componen. En términos del conjunto de la flota de última milla, el perfil corporativo joven representa en torno al 66 %, el perfil envejecido alrededor del 21 % y los vehículos eléctricos el 13 % restante. El dato relevante es que apenas uno de cada cinco vehículos pertenece al segmento envejecido, pero es precisamente ese segmento el que concentra las normas Euro más antiguas y, con ellas, las emisiones de NO_x y partículas más elevadas de toda la flota. Ese 21% se compone de los furgones diésel de los autónomos, que suponen el 8,75% de la flota total, y de la fracción envejecida del canal HORECA que completa el resto.

La antigüedad así caracterizada es la que conecta el parque de partida con sus emisiones: a partir de la edad de cada vehículo se determina su año de matriculación y, con él, la norma Euro que le corresponde, de la que dependen sus factores de emisión de contaminantes locales. Esta correspondencia entre antigüedad, norma Euro y factores de emisión se desarrolla en el apartado 3.6.4, dentro de la caracterización técnica de la flota. Con ello queda completa la descripción del parque de partida: su composición por tipo y tecnología (apartados 2.1 a 2.3) y su distribución de antigüedad (este apartado), base sobre la que se simularán las estrategias de renovación y electrificación.

3.5 HORARIOS DEL REPARTO

La caracterización temporal de la actividad logística es un parámetro clave del modelo, ya que determina tanto los picos de congestión que genera el reparto como el tiempo que la flota permanece disponible para recargar. La Distribución Urbana de Mercancías se concentra de forma acusada en la franja matinal: según un análisis de Deloitte recogido en la Monografía de la Distribución Urbana del Observatorio de la Movilidad Metropolitana [23], el 98 % de las rutas y paradas del abastecimiento a hostelería (HORECA) se realizan entre las 7:00 y las 13:00 h, coincidiendo con el reabastecimiento de bares, restaurantes y cafeterías antes y durante el servicio de mediodía.

Aunque este dato procede específicamente del canal HORECA, el presente modelo lo adopta como ventana de operación única para el conjunto de la flota de última milla, tanto el reparto comercial (B2B) como la paquetería a particulares (B2C). Esta unificación constituye una hipótesis de diseño justificada por dos motivos: por un lado, el reparto comercial, encabezado por el HORECA, representa la mayor parte del parque circulante; por otro, usar una única franja horaria, en lugar de repartir la actividad por toda la jornada, evita tener que modelar las pocas entregas sueltas que se producen fuera de ese horario y simplifica los cálculos de energía posteriores. Cabe señalar como limitación del modelo que la paquetería B2C presenta en la realidad un patrón más vespertino, ligado a la disponibilidad del destinatario en el domicilio; no obstante, dado que la recarga se produce mayoritariamente fuera de la ventana de operación, esta simplificación no altera de forma significativa el cálculo de la infraestructura de recarga.

De este modo, el modelo establece un bloque ininterrumpido de seis horas (7:00-13:00 h) como ventana horaria única para la totalidad de los repartos. En consecuencia, cada vehículo permanece operativo seis horas al día y dispone de las dieciocho horas restantes (13:00-7:00 h) como ventana de recarga. Este amplio margen, durante el cual la flota se encuentra estacionada en sus bases o en los *microhubs*, define el tiempo disponible para la reposición energética.

Dentro de esta amplia ventana de disponibilidad, el modelo asume que la recarga se concentra en las horas valle nocturnas. Aunque la flota está estacionada desde las 13:00 h, programar la carga durante la madrugada responde a un criterio económico: el precio de la electricidad es sensiblemente menor en las horas valle, lo que reduce el coste energético de la operación y mejora la comparación frente al diésel en el posterior análisis de coste total de propiedad (TCO). Además, la amplitud de esta franja nocturna permite recargar los vehículos con cargadores de menor potencia y escalonar las conexiones para evitar un pico de demanda simultáneo, optimizando tanto la potencia contratada como el número de puntos de recarga del *microhub*. Esta hipótesis de recarga nocturna en valle constituye la base sobre la que se dimensionará la infraestructura de carga en los capítulos siguientes.

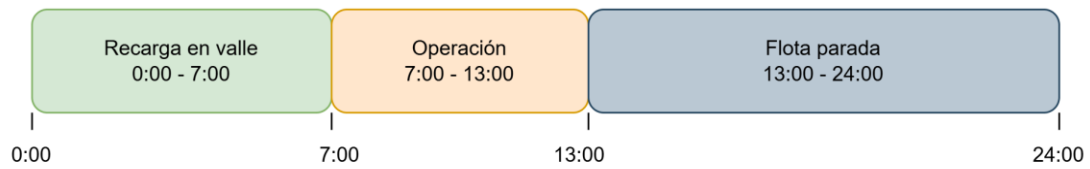


Figura 17: Línea de tiempo del horario de la flota de última milla - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas'

3.6 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA FLOTA

Para que las simulaciones posteriores reflejen el comportamiento real de la última milla, cada uno de los tipos de vehículo identificados en el capítulo anterior debe quedar caracterizado mediante los parámetros técnicos que alimentarán el modelo: el consumo energético, la capacidad de carga y las emisiones que genera. Este capítulo recopila dichos parámetros para los once tipos de vehículo que componen la flota de referencia.

La caracterización se organiza en dos grupos según el tipo de propulsión, ya que las magnitudes relevantes son diferentes en ambos grupos. En los vehículos de combustión interna, el parámetro determinante es el consumo volumétrico de combustible (L/100 km), del que se derivan tanto el coste operativo como las emisiones de CO₂ y de contaminantes locales. En los vehículos 100 % eléctricos, en cambio, interesan la capacidad de la batería (kWh), el consumo eléctrico (kWh/100 km) y la autonomía resultante, que condicionan la operación diaria y la recarga. Por este motivo, los apartados siguientes tratan por separado la flota de combustión interna y la flota eléctrica, y un último apartado recoge los factores de emisión empleados en el modelo.

3.6.1 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN

Antes de detallar cada grupo, conviene definir los parámetros que se recogen para todos los vehículos y el criterio seguido para obtenerlos. Tres de ellos son comunes a las dos tecnologías. Los modelos representativos anclan cada arquetipo a vehículos reales presentes en el mercado español, de modo que las especificaciones empleadas correspondan a equipos en circulación. La masa máxima autorizada (MMA) define la categoría del vehículo y su tratamiento normativo, incluido el acceso a las Zonas de Bajas Emisiones, y condiciona, además, su consumo. El volumen de carga, expresado en metros cúbicos, determina la cantidad de mercancía que transporta cada vehículo.

A estos parámetros comunes se añaden los específicos de cada tecnología. En los vehículos de combustión interna, el parámetro central es el consumo urbano (L/100 km): se toma el correspondiente al ciclo urbano real, de arranques y paradas frecuentes, característico de la última milla, y no el valor homologado combinado, que subestima el gasto en ciudad. De este consumo se derivan tanto el coste de combustible como las emisiones de CO₂ y de contaminantes locales (NO_x y partículas), cuyo cálculo se detalla en el apartado 3.6.4.3.

En los vehículos 100 % eléctricos, la caracterización energética se basa en tres magnitudes: la capacidad de la batería (kWh), que indica la energía almacenable; el consumo eléctrico urbano (kWh/100 km); y la autonomía (km), obtenida a partir de las dos anteriores, que permite comprobar que cada vehículo cubre su ruta diaria con una sola carga.

En cuanto a las fuentes, las especificaciones físicas y energéticas (MMA, volumen, batería y consumos) proceden de las fichas técnicas de los fabricantes de los modelos representativos, mientras que los factores de emisión se apoyan en el inventario EMEP/EEA y en el factor de CO₂ propio de cada combustible. Cuando un parámetro no figura de forma directa en las fuentes, se adopta un valor representativo de la categoría, indicándolo de forma expresa.

3.6.2 FLOTA DE COMBUSTIÓN INTERNA

La Tabla 7 recoge los seis tipos de vehículo de combustión interna que componen la flota de referencia. Para cada uno se indican los modelos comerciales que se han tomado como representativos, su masa máxima autorizada, el volumen útil de carga y el consumo urbano de combustible. Los modelos seleccionados corresponden a vehículos de uso habitual en el reparto urbano en España, de modo que las cifras reflejen equipos en circulación. El consumo se expresa en litros cada 100 km y corresponde al ciclo urbano, de arranques y paradas frecuentes, que es superior al valor homologado combinado que publican los fabricantes; este último subestima el gasto real en ciudad, por lo que se han adoptado valores urbanos representativos. En el caso de los vehículos frigoríficos, el consumo incorpora el sobreconsumo del equipo de frío sobre el del vehículo equivalente sin refrigerar. Se adopta un recargo del 20%, coherente con el incremento del 19,0% medido por Fabris et al. En una misión de reparto urbano con un camión frigorífico de tamaño medio. Las masas y los volúmenes de carga indicados son valores representativos de cada categoría, ya que varían según la configuración concreta de cada modelo.

Tabla 7: Características de vehículos de combustión - Fuente: elaboración propia

Tipo de vehículo	Modelos representativos	MMA (t)	Volumen de carga (m3)	Consumo urbano (L/100km)
Furgones diésel L2H2	Mercedes Sprinter L2H2, Iveco Daily	3,5	9,5	10,0 [29] [30]
Camiones rígidos diésel	Renault Trucks D, Iveco Eurocargo, MAN TGM	≈ 16	≈35	22,0 [31] [32]
Furgones frigoríficos diésel	Chasis L2H2 (Sprinter/Daily) + equipo de frío	3,5	≈8	12,0 furgón base +20% [29], [5]
Motos de combustión	Honda PCX 125, Honda Forza 125, Yamaha NMAX	0,3	≈0,1	3,0 [33] [34]
Camiones rígidos frigoríficos diésel	Chasis rígido (D/Eurocargo) + equipo de frío	≈ 16	≈30	26,0 furgón base +20% [5], [31]
Furgonetas diésel L1H1	Renault Kangoo, Citroën Berlingo, Peugeot Partner	2,2	3,3-4,4	6,0 [35]

Nota: MMA y volúmenes de carga a partir de las fichas técnicas de los fabricantes [36], [37],[35] y clasificación de vehículos industriales [38]

3.6.3 FLOTA 100% ELÉCTRICA

La Tabla 8 recoge los cinco tipos de vehículo 100 % eléctrico de la flota, caracterizados por su capacidad de batería, su consumo eléctrico y su autonomía. Estos tres parámetros no son independientes, sino que están ligados por la relación $\text{autonomía} = (\text{batería} / \text{consumo}) \times 100$. Por ello, para cada vehículo se toman de fuente dos de los tres parámetros y se calcula el tercero, de modo que cada cifra sea trazable. En las furgonetas eléctricas (L1H1 y L2H2), para las que se dispone de mediciones de consumo en uso real, se referencian la batería y el consumo, y se calcula la autonomía. En el resto de vehículos (motos, microdistribución y camión), donde el fabricante publica la autonomía, pero no un consumo urbano contrastado, se referencian la batería y la autonomía, y se calcula el consumo. Este criterio prioriza el consumo urbano real y mantiene la coherencia con la flota de combustión, caracterizada igualmente por su consumo urbano real, evitando subestimar la demanda energética sobre la que se dimensionará la infraestructura de recarga. La MMA y el volumen de carga, comunes con la flota de combustión, proceden igualmente de las fichas de los fabricantes.

Tabla 8: Características de vehículos 100% eléctricos - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.

Tipo de vehículo	Modelos representativos	MMA (t)	Volumen de carga (m3)	Batería (kWh)	Consumo (kWh/100km)	Autonomía (km)
Motos eléctricas	Silence S02 (Delivery)	0,3	≈ 0,1	5,6 [39]	4,1	137 [39]
Furgonetas eléctricas L1H1	Peugeot e-Partner, Citroën e-Berlingo	2,4	3,3 - 4,4	50 [40]	22,7 [41]	≈220
Furgones eléctricos L2H2	Ford E-Transit, Mercedes e-Sprinter	3,5	≈9,5	75 [42]	30,8 [42]	≈245
Micro distribución eléctrica (Scoobic)	Scoobic Light	0,65	2,2	4,8 [43]	5,3	90 [43]
Camiones eléctricos (16t)	Renault Trucks D E-Tech	16	≈35	265 [44]	106	250 [44]

Valores calculados mediante $\text{autonomía} = \text{batería} \div \text{consumo} \times 100$: el consumo en motos, microdistribución y camión; la autonomía en las furgonetas. MMA y volúmenes de carga: fichas técnicas de los fabricantes [39], [40], [45] y [43].

3.6.4 FACTORES DE EMISIÓN

El último paso de la caracterización consiste en asignar a cada vehículo los factores que traducen su actividad, los kilómetros recorridos y el combustible consumido, en emisiones contaminantes. Estos factores son los que, aplicados sobre la operación diaria de la flota, permitirán al modelo cuantificar el impacto ambiental del escenario de partida y de las distintas estrategias de descarbonización. El apartado se organiza en tres bloques: en primer lugar, se define el alcance del cálculo y la metodología empleada para cada contaminante; a continuación, se recogen los factores de emisión del vehículo de referencia; y por último se detalla cómo varían esos factores con la antigüedad del vehículo.

3.6.4.1 Alcance y metodología

El estudio adopta un alcance Tank-to-Wheel (del depósito a la rueda): se contabilizan únicamente las emisiones que genera el vehículo durante su circulación, y no las asociadas a la producción del combustible o de la electricidad que consume. Bajo este enfoque, los vehículos 100 % eléctricos se consideran de cero emisiones directas de CO₂, NO_x y partículas, ya que no realizan ninguna combustión durante su uso. Este es, además, el criterio con el que las Zonas de Bajas Emisiones clasifican a los vehículos, lo que hace que el alcance elegido sea coherente con el marco normativo que regula el acceso a la ciudad.

Se caracterizan tres contaminantes, que responden a dos escalas de impacto distintas. El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero de alcance global, ligado al impacto climático del transporte. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas en suspensión (PM) son contaminantes locales, que deterioran la calidad del aire de la ciudad y afectan directamente a la salud de la población en las zonas de mayor densidad de tráfico. Esta distinción es relevante porque ambos tipos de emisión se calculan de forma diferente y responden a factores distintos.

El CO₂ se determina directamente a partir del consumo de combustible, ya que cada litro quemado libera una cantidad fija de dióxido de carbono, independiente de la tecnología del motor o de su antigüedad: 2,64 kg de CO₂ por litro de gasóleo y 2,39 kg por litro de gasolina. Multiplicando el consumo de cada vehículo por el factor de su combustible se obtiene su emisión de CO₂ por kilómetro. Por depender solo del consumo, el CO₂ es un factor constante para cada tipo de vehículo.

Los NO_x y las partículas, en cambio, no dependen del combustible consumido sino de la tecnología del motor y, sobre todo, de la norma Euro con la que se homologó el vehículo. Sus factores de emisión se toman del inventario EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook [14], que publica valores por categoría de vehículo, tipo de combustible y norma Euro. Dado que la norma Euro depende del año de matriculación, y este de la antigüedad, estos dos contaminantes varían con la edad del vehículo, a diferencia del CO₂. Esta dependencia se desarrolla en el apartado 3.6.4.3.

3.6.4.2 Factores de emisión del vehículo de referencia

La Tabla X recoge los factores de emisión de cada tipo de vehículo en su versión de referencia, entendida como la del vehículo recién matriculado, es decir, el más limpio disponible en el mercado. Estos son los valores hacia los que converge la flota a medida que se renueva, y constituyen la base sobre la que el apartado siguiente introduce el efecto del envejecimiento. El CO₂ se obtiene, como se ha indicado, multiplicando el consumo de cada vehículo por el factor de su combustible, y es un valor definitivo, ya que no varía con la antigüedad. Los factores de NO_x y de partículas corresponden a la norma Euro más reciente de cada categoría: Euro 6 d/e en las furgonetas y furgones diésel, Euro VI d/e en los camiones y Euro 5 en las motocicletas de gasolina.

Tabla 9: Factores de emisión del vehículo de referencia - Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.

Tipo de vehículo	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)	PM (g/km)
Motos de combustión (gasolina)	72	0,022	8,75·10 ⁻⁴
Furgonetas diésel L1H1	158	0,142	1,93·10 ⁻⁴
Furgones diésel L2H2	264	0,142	1,93·10 ⁻⁴
Furgones frigoríficos diésel	317	0,142	1,93·10 ⁻⁴
Camiones rígidos diésel	581	0,315	2,38·10 ⁻³
Camiones rígidos frigoríficos diésel	686	0,315	2,38·10 ⁻³
Flota 100% eléctrica	0	0	0

CO₂: elaboración propia (consumo × factor del combustible: 2,64 kg/L gasóleo, 2,39 kg/L gasolina). NO_x y PM: factores Tier 2 del inventario [14] — furgonetas N1 diésel Euro 6 d/e; camiones Rigid 14-20 t Euro VI d/e; motos 4T <250 cm³ Euro 5. Vehículos eléctricos: cero por el alcance Tank-to-Wheel.

3.6.4.3 Variación de NO_x y PM con la antigüedad

Los factores del vehículo de referencia recogidos en el apartado anterior corresponden a la unidad más reciente de cada tipo y representan, por tanto, el mínimo alcanzable. La flota real, sin embargo, está compuesta en su mayor parte por vehículos de mayor antigüedad, caracterizada en el apartado 3.4, que se homologaron con normas Euro anteriores y emiten más NO_x y partículas. Dado que ambos contaminantes dependen de la norma de homologación, y esta del año de matriculación, sus factores no pueden fijarse en un único valor por tipo, sino que deben asignarse en función de la edad de cada vehículo.

El modelo establece esta asignación mediante una cadena directa: a partir de la edad del vehículo se obtiene su año de matriculación, restando la edad al año de simulación; de ese año se deduce la norma Euro vigente en el momento de la matriculación; y a cada norma le

corresponde un factor de NO_x y de partículas tomado del inventario EMEP/EEA [14]. Esta correspondencia se aplica con dos criterios. En primer lugar, cada año de matriculación se asigna a una única norma, lo que permite trabajar con una resolución anual y evita la ambigüedad en los años de transición entre normas. En segundo lugar, los vehículos anteriores a la norma más antigua tabulada (Euro 3 en furgonetas y motocicletas, Euro III en camiones) se modelizan con el factor de esa norma, que actúa como valor suelo. La Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 recogen, para cada categoría, la norma Euro correspondiente a cada rango de edad, referida al año base 2026, y sus factores de NO_x y partículas.

Tabla 10: Factores de emisión NO_x y PM por norma Euro y antigüedad. Furgonetas diésel
– Fuente: elaboración propia a partir de [14]

Norma Euro	Edad en 2026 (años)	NO_x (g/km)	PM(g/km)
Euro 6 d/e	0-5	0,142	$1,93 \cdot 10^{-4}$
Euro 6 d-temp	6-8	0,512	$1,93 \cdot 10^{-4}$
Euro 6 a/b/c	9-11	1,108	$1,93 \cdot 10^{-4}$
Euro 5	12-15	1,374	$2,01 \cdot 10^{-4}$
Euro 4	16-20	0,839	$4,59 \cdot 10^{-2}$
Euro 3 (y anterior)	>20	1,037	$8,52 \cdot 10^{-2}$

Tabla 11: Factores de emisión NO_x y PM por norma Euro y antigüedad. Camiones diésel
– Fuente: elaboración propia a partir de [14]

Norma Euro	Edad en 2026 (años)	NO_x (g/km)	PM(g/km)
Euro VI d/e	0-7	0,315	$2,38 \cdot 10^{-3}$
Euro VI a/b/c	8-13	0,409	$2,38 \cdot 10^{-3}$
Euro V	14-18	3,035	$2,41 \cdot 10^{-2}$
Euro IV	19-21	3,525	$2,64 \cdot 10^{-2}$
Euro III	>21	5,101	$1,13 \cdot 10^{-1}$

Tabla 12: Factores de emisión NO_x y PM por norma Euro y antigüedad. Motocicletas de gasolina – Fuente: elaboración propia a partir de [36]

Norma Euro	Edad en 2026 (años)	NO _x (g/km)	PM(g/km)
Euro 5	0-6	0,022	$8,75 \cdot 10^{-4}$
Euro 4	7-10	0,033	$8,75 \cdot 10^{-4}$
Euro 3 (y anterior)	>10	0,068	$5,00 \cdot 10^{-3}$

Las tablas revelan un comportamiento contraintuitivo que merece atención: en las furgonetas diésel, el NO_x no disminuye de forma continua con el avance de la norma. El Euro 5 (1,374 g/km) emite más NO_x que el Euro 4 (0,839 g/km) e incluso que el Euro 3 (1,037 g/km). Lejos de tratarse de un error, este salto refleja un fenómeno real y documentado: la tecnología diésel de la etapa Euro 5 priorizó la reducción de partículas, con la generalización del filtro que hizo caer el PM en un factor de más de doscientas veces, a costa de un aumento de las emisiones de NO_x en circulación real. Solo con la introducción del ensayo de emisiones en condiciones reales de conducción (RDE) en la etapa Euro 6 d el NO_x se reduce de forma efectiva, hasta los 0,142 g/km del Euro 6 d/e. Este hecho tiene una implicación relevante para el estudio: la mera renovación de un vehículo antiguo por otro algo más moderno no garantizaba reducir el NO_x hasta la llegada del Euro 6 d, lo que refuerza el papel del salto tecnológico, y en particular de la electrificación, como única vía de reducción cierta de este contaminante.

El CO₂ no se incluye en estas tablas ya que, al depender únicamente del consumo de combustible, permanece constante con la antigüedad y queda recogido en el apartado 3.6.4.2. Los factores de NO_x y partículas por norma Euro aquí definidos son los que el modelo de simulación aplica a cada vehículo según su edad y los que, al envejecer o renovar la flota a lo largo del horizonte simulado, determinan la evolución de las emisiones locales.

3.6.5 RESUMEN DE LA FLOTA DE REFERENCIA DE ÚLTIMA MILLA

Tabla 13: Tabla resumen de la flota de referencia de última milla - Fuente: Elaboración propia

Tipo de vehículo	Consumo (/100km)	Batería (kWh)	Autonomía (km)	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)	PM (g/km)
Motos de combustión	3,0 L	-	-	72	0,022	8,75·10 ⁻⁴
Furgonetas diésel L1H1	6,0 L	-	-	158	0,142	1,93·10 ⁻⁴
Furgones diésel L2H2	10,0 L	-	-	264	0,142	1,93·10 ⁻⁴
Furgones frigoríficos diésel	12,0 L	-	-	317	0,142	1,93·10 ⁻⁴
Camiones rígidos diésel	22,0 L	-	-	581	0,315	2,38·10 ⁻³
Camiones rígidos frigoríficos diésel	26,0L	-	-	686	0,315	2,38·10 ⁻³
Motos eléctricas	4,1 kWh	5,6	137	0	0	0
Furgonetas eléctricas L1H1	22,7 kWh	50	220	0	0	0
Furgones eléctricos L2H2	30,8 kWh	75	245	0	0	0
Micro distribución eléctrica (Scoobic)	5,3 kWh	4,8	90	0	0	0
Camiones eléctricos (16t)	106 kWh	265	250	0	0	0

Nota: Los factores de NO_x y PM son los del vehículo de referencia; su variación con la antigüedad se detalla en el apartado 3.4. El CO₂ es constante. Los vehículos eléctricos no emiten bajo el alcance Tank-to-Wheel.

Capítulo 4. MODELO DE SIMULACIÓN

Los capítulos anteriores han caracterizado la flota de última milla de Madrid en su estado actual: su composición por tipo de vehículo y tecnología, su distribución de antigüedad y los factores de consumo y emisión de cada vehículo. Esa caracterización constituye la fotografía del punto de partida, pero no responde por sí sola a la pregunta central del proyecto: cómo evolucionarán las emisiones y la demanda energética de esa flota si se adoptan distintas estrategias de descarbonización. Para responderla es necesario proyectar la flota en el tiempo, y ese es el objetivo del modelo de simulación que se desarrolla en este capítulo.

El modelo parte de la flota caracterizada en el año base (2026) y simula su evolución año a año hasta 2050, reproduciendo el envejecimiento natural del parque y su renovación progresiva. Sobre esta dinámica común se definen tres escenarios independientes, cada uno de los cuales explora una palanca distinta de la transición: la velocidad a la que se renueva la flota, la tecnología con la que se sustituyen los vehículos retirados y la posibilidad de reorganizar la composición del parque mediante microhubs. Para cada escenario, el modelo cuantifica la evolución de las emisiones de CO₂, NO_x y partículas, así como la demanda de energía eléctrica asociada a la electrificación.

El capítulo se organiza en tres bloques. En primer lugar, se expone el planteamiento del modelo: su estructura, el mecanismo de evolución temporal de la flota y los parámetros de entrada. A continuación, se definen los tres escenarios de simulación. Por último, se presentan y analizan los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

4.1 ESTRUCTURA Y DINÁMICA DEL MODELO

El modelo representa la flota mediante una matriz de cohortes, en la que cada elemento indica el número de vehículos de un tipo determinado y una edad determinada. Las filas corresponden a los once tipos de vehículo caracterizados en el capítulo anterior y las columnas a la edad, con una resolución de un año. Esta estructura permite conocer en todo momento no solo cuántos vehículos de cada tipo componen la flota, sino también su antigüedad, que es el dato del que dependen las emisiones de contaminantes locales.

La resolución anual de la edad no es un detalle accesorio, sino un requisito del modelo. Como se expuso en el apartado 3.4, la norma Euro de un vehículo, y con ella su factor de emisión de NO_x y partículas, se determina a partir de su año de matriculación. Las bandas de antigüedad empleadas para caracterizar el parque, de cinco años, no coinciden con las fronteras entre normas Euro, de modo que una misma banda puede contener vehículos de dos normas distintas. Trabajar con la edad año a año permite asignar a cada vehículo la norma que le corresponde exactamente, sin las ambigüedades que introduciría una resolución más gruesa.

Sobre esta matriz, el modelo simula la evolución de la flota mediante un bucle que avanza año a año desde 2026 hasta 2050, como se muestra en la Figura 18. En cada paso anual se

aplican tres operaciones sucesivas. En primer lugar, toda la flota envejece un año, lo que en la matriz equivale a desplazar cada cohorte a la columna de edad siguiente. En segundo lugar, los vehículos que alcanzan la edad de jubilación establecida se retiran de la flota. En tercer lugar, esos vehículos retirados se reemplazan por unidades nuevas, de edad cero, cuyo tipo y tecnología dependen de la estrategia de renovación del escenario que se esté simulando. De este modo, el tamaño total de la flota se mantiene constante a lo largo de toda la simulación: cada vehículo jubilado da lugar a uno nuevo.

Un aspecto determinante del modelo es el tratamiento de la norma Euro a lo largo del tiempo. La norma de homologación de un vehículo queda fijada en el momento de su fabricación y no varía durante su vida útil: un vehículo matriculado en 2021 conserva su norma tanto a los cinco como a los veinte años. En consecuencia, el factor de emisión de NO_x y partículas de cada vehículo no depende de su edad en el año simulado, sino de su año de matriculación, que se obtiene restando la edad al año en curso. Los vehículos que entran en la flota por renovación reciben la norma más reciente disponible. Esta distinción tiene una consecuencia importante para la interpretación de los resultados: el mero envejecimiento de la flota no incrementa sus emisiones, ya que ningún vehículo empeora su norma al hacerse viejo; lo que modifica las emisiones a lo largo del tiempo es exclusivamente la renovación, es decir, la salida de los vehículos antiguos y la entrada de otros más limpios.

La flota de la que parte la simulación en el año base es la caracterizada en los capítulos anteriores: su composición por tipo de vehículo (apartado 3.3) y su distribución de antigüedad por perfil (apartado 3.4) determinan el contenido inicial de la matriz de cohortes. A partir de ese estado inicial, y en cada año de la simulación, el modelo evalúa las emisiones de CO₂, NO_x y partículas y la demanda de energía eléctrica de la flota, aplicando a cada cohorte los factores de consumo y emisión definidos en el apartado 3.6.4. El resultado es una serie temporal de emisiones y energía para cada escenario, que constituye la salida del modelo.

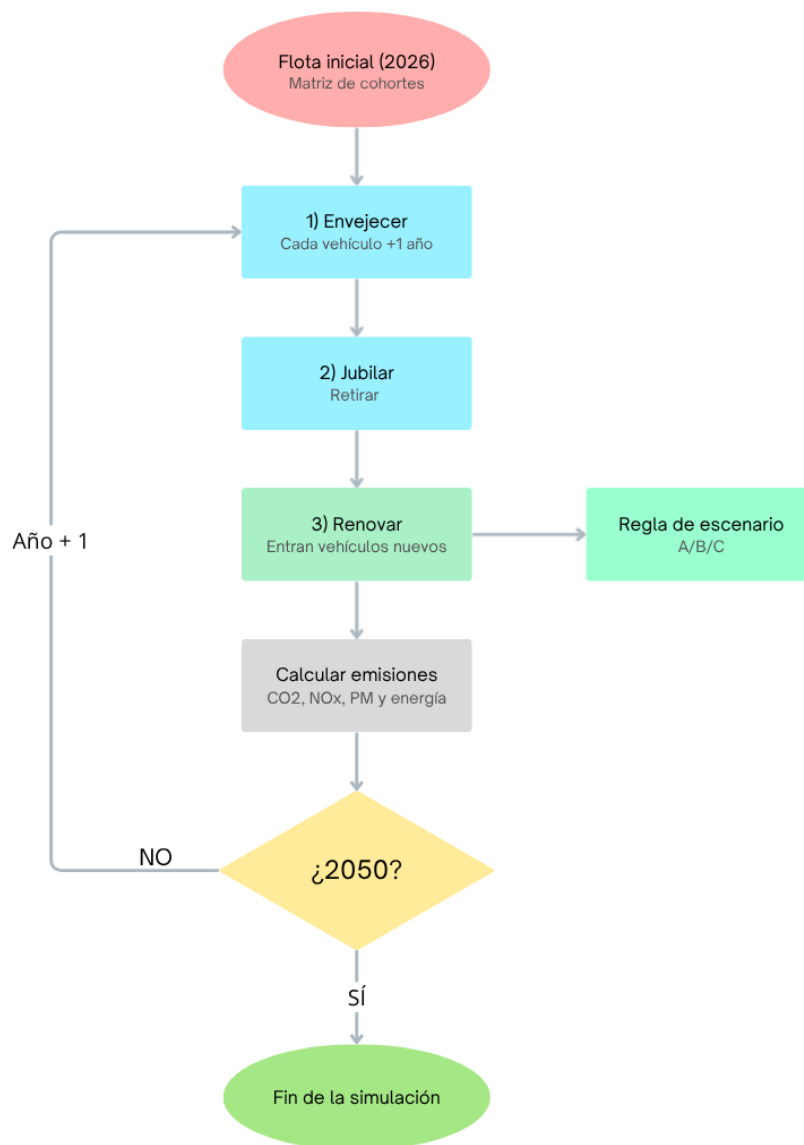


Figura 18: Esquema del ciclo anual del modelo de simulación – Fuente: elaboración propia

4.2 PARÁMETROS DE ENTRADA

El modelo se alimenta de un conjunto de parámetros que definen tanto la flota de partida como las condiciones de operación sobre las que se calcula su impacto. La mayor parte de ellos proceden de la caracterización desarrollada en los capítulos anteriores y se recuperan aquí de forma sintética; otros son propios de la simulación y se establecen a continuación.

El primero es el tamaño de la flota. Ante la ausencia de un censo público que cuantifique el número exacto de vehículos de reparto de última milla que operan en Madrid, el modelo trabaja con una flota representativa, sobre la que se aplican las proporciones por tipo de vehículo obtenidas en el apartado 3.3. Esta elección no condiciona las conclusiones del estudio, ya que los escenarios se comparan entre sí y los resultados se expresan principalmente en términos relativos; el número absoluto de vehículos actúa únicamente como factor de escala. En consecuencia, se define como un parámetro de entrada ajustable, lo que permite escalar los resultados a cualquier tamaño de flota sin alterar la estructura del modelo.

El segundo parámetro es la distancia anual recorrida por cada vehículo, de la que dependen directamente tanto las emisiones como el consumo energético. Esta distancia se construye a partir de la ventana de operación caracterizada en el apartado 3.5, combinando la velocidad media de circulación en el entorno urbano de Madrid, las horas de operación diarias y los días operativos al año. La velocidad efectiva de reparto se establece en 15 km/h, un valor intermedio que refleja las condiciones reales de circulación en la ciudad, más lentas en el centro y sujetas a paradas frecuentes. Con una ventana de operación de seis horas diarias durante 250 días laborables al año, resulta una distancia de aproximadamente 22.500 kilómetros anuales por vehículo. Este valor se asume homogéneo para toda la flota, como hipótesis coherente con una ventana de operación única, y se implementa igualmente como parámetro ajustable.

El tercer conjunto de parámetros lo constituyen los factores técnicos y de emisión de cada tipo de vehículo: el consumo de combustible o de energía eléctrica, la capacidad de batería y la autonomía en el caso de los vehículos eléctricos, y los factores de emisión de CO₂, NO_x y partículas. Todos ellos se han definido y justificado en el apartado 3.6.4, y son los que el modelo aplica a cada vehículo en función de su tipo y, para los contaminantes locales, de su antigüedad. La distribución de edades de la flota inicial, por su parte, se toma de los perfiles caracterizados en el apartado 3.4.

Por último, el modelo requiere fijar el horizonte temporal de la simulación. Se establece el periodo comprendido entre el año base, 2026, y el año 2050, horizonte que se corresponde con el objetivo de neutralidad climática de la Unión Europea y que resulta suficientemente amplio para que la flota se renueve por completo varias veces, permitiendo observar la evolución de las emisiones hasta su estabilización bajo cada estrategia.

4.3 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS

Sobre la dinámica común descrita en los apartados anteriores, el modelo define tres escenarios de simulación independientes. Cada uno explora una palanca distinta de la transición hacia una flota descarbonizada y se simula por separado, de modo que sus resultados puedan analizarse y compararse de forma aislada. Los tres comparten el mismo mecanismo de evolución de la flota y se diferencian únicamente en la regla que gobierna la renovación de los vehículos, es decir, en qué ocurre cuando un vehículo alcanza el final de su vida útil y es sustituido.

4.3.1 ESCENARIO A: VELOCIDAD DE RENOVACIÓN

El primer escenario analiza el efecto de la velocidad a la que se renueva la flota. La palanca que se modifica es la edad de jubilación, esto es, la antigüedad a la que un vehículo se retira y se sustituye por uno nuevo. Cuanto menor es esa edad, más rápidamente se depura el parque de vehículos antiguos. En este escenario, cada vehículo retirado se reemplaza por otro del mismo tipo y tecnología, pero de nueva matriculación, con el fin de aislar el efecto de la velocidad de renovación sin mezclarlo con un cambio tecnológico. De este modo, el escenario responde a una pregunta concreta: cuánto se reducen las emisiones simplemente acelerando la renovación de la flota, manteniendo el diésel.

Se simulan varias edades de jubilación, desde una renovación agresiva hasta una conservadora, junto con un caso base que representa la renovación natural del parque en ausencia de una política específica. La comparación entre ellas permite cuantificar el beneficio marginal de acelerar la renovación.

4.3.2 ESCENARIO B: TECNOLOGÍA DE RENOVACIÓN

El segundo escenario mantiene fija la velocidad de renovación y modifica la tecnología con la que se sustituyen los vehículos retirados. Frente al escenario A, en el que el reemplazo era siempre un vehículo diésel nuevo, aquí los vehículos jubilados se sustituyen por sus equivalentes eléctricos. Se contemplan dos variantes: una de electrificación total, en la que todo vehículo retirado se reemplaza por su equivalente eléctrico, y otra de electrificación parcial, en la que solo una fracción de las sustituciones es eléctrica y el resto se renueva con diésel nuevo.

Este escenario incorpora una restricción realista: los vehículos frigoríficos no se consideran electrificables, dada la limitación que impone el consumo del equipo de frío sobre la autonomía de la batería con la tecnología actual. En consecuencia, estos vehículos se siguen renovando con unidades diésel, lo que introduce en los resultados un residuo de emisiones que la electrificación no puede eliminar. El escenario B permite así cuantificar el impacto de la electrificación sobre las emisiones y, de forma complementaria, la demanda de energía eléctrica que esta conlleva.

4.3.3 ESCENARIO C: COMPOSICIÓN DEL PARQUE

El tercer escenario explora una vía distinta a las anteriores. En lugar de sustituir cada vehículo por otro equivalente, plantea la posibilidad de reorganizar la composición del parque, reemplazando un tipo de vehículo por una combinación de otros que preste el mismo servicio de reparto. Esta lógica responde al concepto de microhub: un vehículo de gran capacidad que opera en el centro urbano puede sustituirse por varias unidades más pequeñas y de menor impacto, como furgonetas ligeras eléctricas o vehículos de microdistribución, que cubran el mismo volumen de carga.

En concreto, el escenario aplica esta descomposición a los dos vehículos de mayor tamaño de la flota, el furgón diésel L2H2 y el camión rígido diésel, por ser los candidatos naturales a operar desde un microhub. Los vehículos frigoríficos quedan excluidos, en coherencia con el escenario anterior, dada la dificultad de fragmentar la cadena de frío en unidades pequeñas. La descomposición no se aplica a la totalidad de estos vehículos, sino únicamente a la fracción que opera en el centro urbano, estimada en un 30%, ya que fuera de esa zona el vehículo de gran capacidad sigue siendo la opción más eficiente. Los vehículos que entran en sustitución son eléctricos, en línea con el propósito de un reparto de cero emisiones en el centro.

La equivalencia entre el vehículo sustituido y la combinación que lo reemplaza se establece con base en el volumen de carga, garantizando que la capacidad de reparto se mantiene constante. Así, cada furgón L2H2 se reemplaza por dos furgonetas ligeras eléctricas y un vehículo de microdistribución, y cada camión rígido por ocho furgonetas ligeras eléctricas y dos vehículos de microdistribución, combinaciones que igualan el volumen de carga del vehículo original. Dado que el kilometraje por vehículo se conserva, la fragmentación del reparto en un mayor número de vehículos implica un incremento de los kilómetros totales recorridos, lo que permite al modelo capturar la penalización asociada a la desconsolidación de la carga. De este modo, el escenario C evalúa el equilibrio entre el beneficio ambiental de introducir vehículos limpios en el centro y el coste, en número de vehículos, kilómetros y energía, de fragmentar el reparto.

Capítulo 5. RESULTADOS DE EVOLUCIÓN DE PARQUE

Una vez definido el modelo y sus escenarios, este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos de la simulación. Para cada escenario se examina la evolución de las emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno y partículas a lo largo del horizonte 2026-2050, así como la demanda de energía eléctrica cuando procede. El análisis no se limita a describir las curvas resultantes, sino que busca interpretar qué revela cada escenario sobre las distintas estrategias de descarbonización y sobre los límites de cada una.

5.1 RESULTADOS DEL ESCENARIO A: VELOCIDAD DE RENOVACIÓN

El escenario A evalúa el efecto de acelerar la renovación de la flota manteniendo la tecnología diésel, comparando distintas edades de jubilación frente a un caso base de renovación natural. La Figura 19 presenta la evolución de los tres contaminantes para cada una de las edades de corte simuladas.

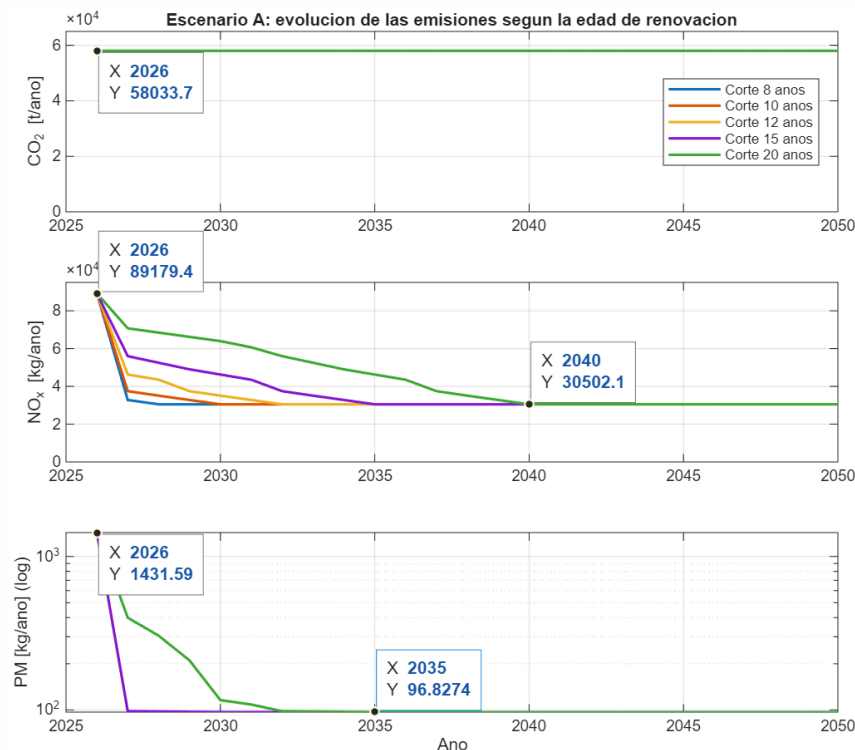


Figura 19: Panel de tres gráficas (CO₂, NO_x, PM) del escenario A - Fuente: elaboración propia

El resultado más inmediato afecta al CO₂, que permanece constante en torno a las 58.000 t/año a lo largo de todo el horizonte e idéntico para todas las edades de jubilación. Este comportamiento es coherente con la naturaleza del escenario: al sustituir cada vehículo por otro del mismo tipo, la composición de la flota no varía, y dado que el CO₂ depende únicamente del consumo de combustible de cada tipo de vehículo, sus emisiones no se ven alteradas por la velocidad de renovación. Se obtiene así una primera conclusión relevante: renovar la flota sin cambiar de tecnología no reduce en absoluto las emisiones de gases de efecto invernadero.

El comportamiento de los óxidos de nitrógeno es sustancialmente distinto. En todas las edades de jubilación, las emisiones de NO_x descienden a lo largo del tiempo, desde las 89.200 kg/año del año de partida, a medida que los vehículos antiguos, homologados con normas Euro más contaminantes, son reemplazados por vehículos nuevos que cumplen la norma más reciente. La velocidad de este descenso depende directamente de la edad de jubilación: una renovación agresiva depura el parque en pocos años, alcanzando el mínimo hacia 2030, mientras que la más conservadora prolonga la transición hasta aproximadamente 2040. Sin embargo, todas las curvas convergen hacia un mismo valor final, en torno a las 30.500 kg/año, lo que supone una reducción del 66% respecto al valor inicial. Este suelo común revela un límite fundamental de la estrategia: por rápido que se renueve la flota, las emisiones de NO_x no pueden reducirse por debajo del nivel que corresponde a un parque diésel íntegramente renovado a la norma más limpia disponible. La renovación acelera la llegada a ese suelo, pero no lo rebaja.

Las partículas siguen un patrón similar al del NO_x, pero con un descenso mucho más abrupto y mucho menos sensible a la velocidad de renovación. Sus emisiones caen desde las ~1.430 kg/año iniciales hasta un valor mínimo en torno a las 97 kg/año, una reducción del 93%. Únicamente la renovación más conservadora, con jubilación a los veinte años, presenta un retardo apreciable antes de alcanzar ese suelo, mientras que las estrategias más rápidas lo alcanzan de forma casi inmediata. Este comportamiento se debe a la generalización del filtro de partículas en las normas Euro más recientes, que reduce las emisiones de PM en más de dos órdenes de magnitud respecto a las normas antiguas.

En conjunto, el escenario A permite extraer una lectura clara. La renovación de la flota, entendida como la simple sustitución de vehículos antiguos por otros nuevos de la misma tecnología, es una medida muy eficaz contra los contaminantes locales, con reducciones del 66% en NO_x y del 93% en partículas, pero completamente inútil frente al CO₂, que no experimenta reducción alguna. Además, incluso para el NO_x, su capacidad de mejora está acotada por un suelo que la tecnología diésel no puede superar. Estas limitaciones son las que motivan el análisis del escenario siguiente, en el que la palanca deja de ser la velocidad de renovación para pasar a ser la tecnología de sustitución.

5.2 RESULTADOS DEL ESCENARIO B: TECNOLOGÍA DE RENOVACIÓN

El escenario B mantiene fija la velocidad de renovación e introduce la electrificación como palanca, comparando dos estrategias de sustitución, una de electrificación total y otra parcial, frente a la renovación con diésel nuevo del escenario A, que actúa como referencia. La Figura 20 presenta la evolución de los tres contaminantes para las tres estrategias.

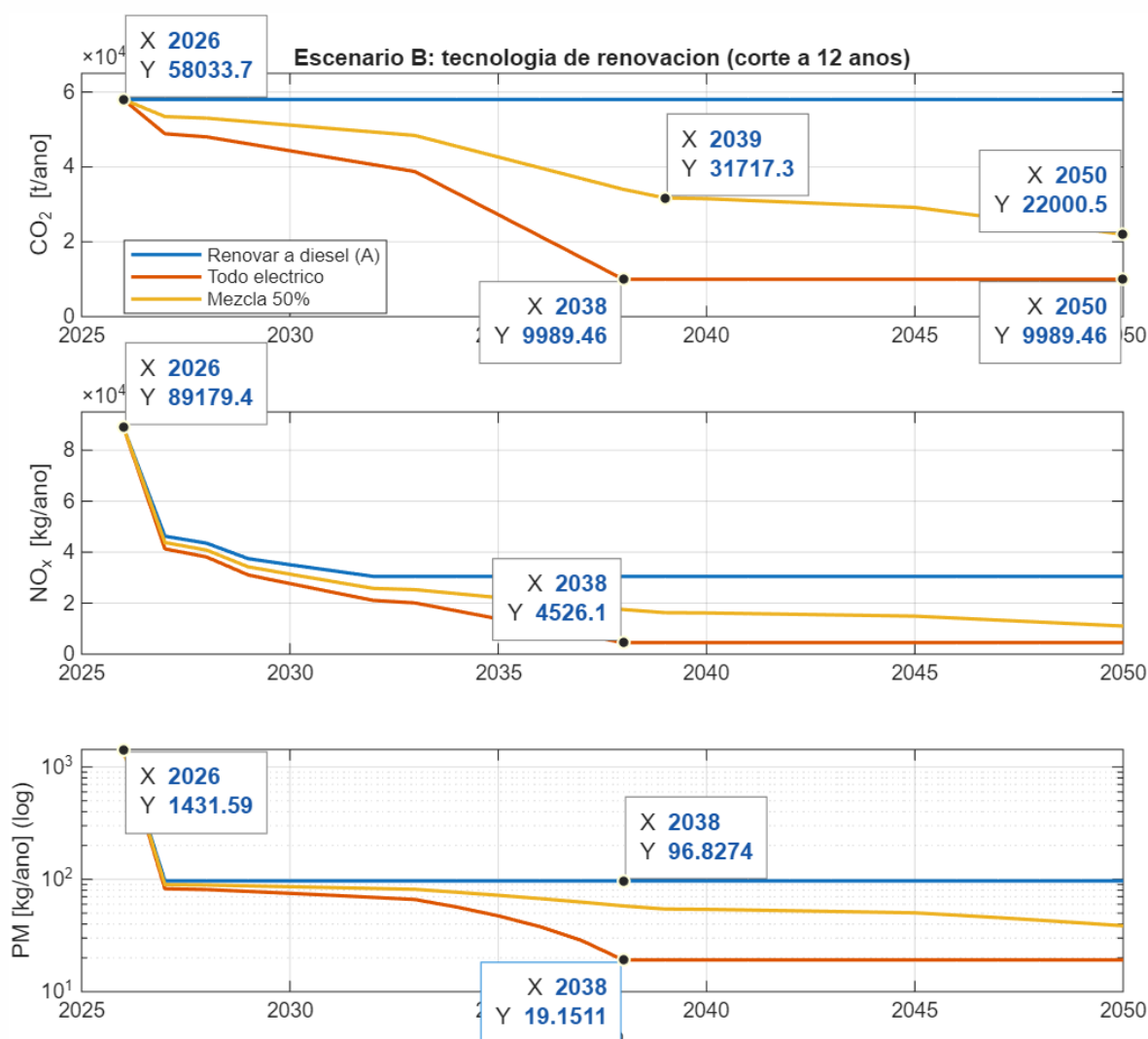


Figura 20: Panel de tres gráficas (CO₂, NO_x, PM) del escenario B - Fuente: elaboración propia

El resultado más significativo se produce en el CO₂, que en el escenario A permanecía inalterable. Al sustituir los vehículos diésel por eléctricos, sus emisiones directas desaparecen, y el CO₂ de la flota descende de forma sostenida a medida que avanza la renovación. Con electrificación total, las emisiones caen desde las ~58.000 t/año iniciales hasta estabilizarse en torno a las 10.000 t/año, una reducción de aproximadamente el 83%.

La electrificación parcial, al renovar solo la mitad de los vehículos con tecnología eléctrica, produce un descenso más lento y menos profundo, situándose hacia el final del horizonte en torno a las 22.000 t/año. Por primera vez, una estrategia consigue atacar las emisiones de gases de efecto invernadero, que la mera renovación era incapaz de reducir.

Ese valor de estabilización de las 10.000 t/año en la electrificación total encierra una de las conclusiones más relevantes del estudio: la electrificación no consigue eliminar por completo el CO₂, sino que deja un residuo irreductible. Ese residuo corresponde a los vehículos frigoríficos, que el modelo considera no electrificables por la limitación de autonomía que impone el equipo de frío, y que continúan renovándose con unidades diésel. La cadena de frío se revela, así como el eslabón más resistente de la descarbonización de la última milla.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno, el escenario B rompe el suelo que limitaba al escenario A. Mientras que la renovación a diésel no podía reducir el NO_x por debajo de los 30.500 kg/año, la electrificación total lo lleva hasta unos 4.500 kg/año, aproximadamente un 95% menos que el valor de partida. La diferencia entre la curva de electrificación y la de renovación a diésel es precisamente la medida de lo que aporta el cambio tecnológico frente a la simple renovación. También aquí la electrificación parcial ocupa una posición intermedia, y también aquí persiste un residuo asociado a los frigoríficos diésel.

Las partículas siguen la misma tendencia, reduciéndose desde el mínimo ya alcanzable por renovación hasta un valor aún inferior con la electrificación, al eliminarse por completo las emisiones de los vehículos sustituidos. No obstante, dado que la renovación por sí sola ya reducía drásticamente el PM gracias al filtro de partículas, la mejora adicional que aporta la electrificación en este contaminante es proporcionalmente menor que la que consigue en CO₂ y NO_x.

Conviene detenerse en la forma que presentan las curvas de electrificación, tanto total como parcial, ya que no descienden de manera uniforme. Tras un descenso moderado en los primeros años, todas ellas muestran una fase de caída más pronunciada aproximadamente entre 2033 y 2038, para estabilizarse después. Este comportamiento no es arbitrario, sino que refleja directamente la estructura de edades del parque de partida. En los primeros años se renuevan fundamentalmente los vehículos del perfil envejecido, que constituyen una fracción minoritaria de la flota, mientras que el perfil corporativo, mayoritario y concentrado en edades inferiores a los cinco años en el año base, aún no ha alcanzado la edad de jubilación. Es en torno a 2033-2038 cuando ese grueso de la flota cruza masivamente el umbral de renovación, lo que provoca una oleada de sustituciones simultáneas y, con ella, la fase de electrificación acelerada que se observa en las curvas. A partir de 2038, una vez rotada por completo la flota inicial, la renovación prosigue de forma regular y las emisiones se estabilizan. La existencia de este «codo» en las curvas es, por tanto, la huella de la distribución de antigüedad caracterizada en el Capítulo 3. : una flota con una edad más homogénea habría dado lugar a una transición más lineal.

Demanda de energía eléctrica

La contrapartida de la electrificación es el incremento de la demanda de energía eléctrica, que constituye un resultado tan relevante como el de las propias emisiones, ya que

condiciona la infraestructura de recarga necesaria. La Figura 21 presenta la evolución de esta demanda para las tres estrategias.

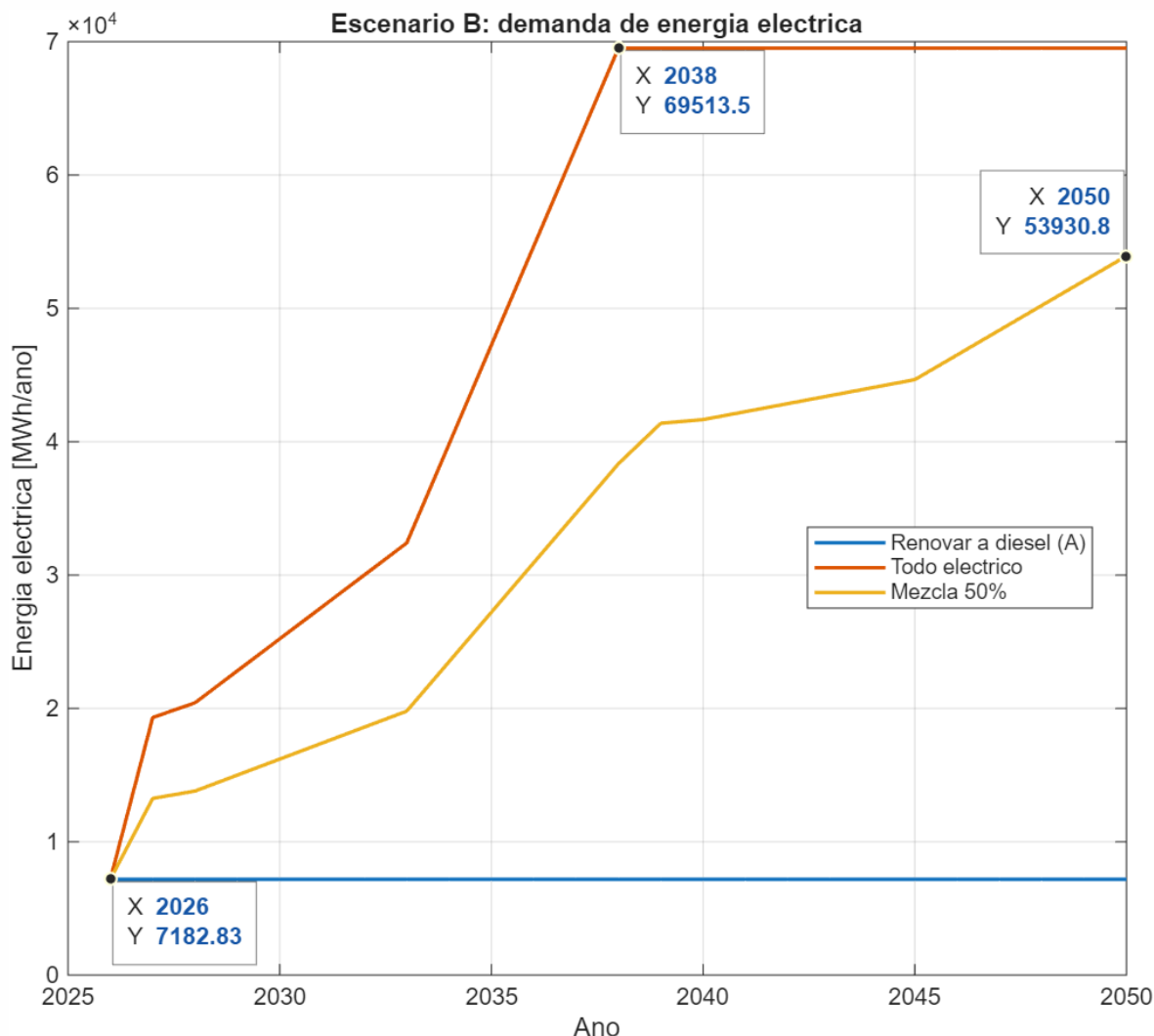


Figura 21: Gráfica de demanda de energía eléctrica del escenario B - Fuente: elaboración propia

En la situación de partida, la demanda corresponde únicamente a la flota eléctrica ya existente, en torno a los 7.000 MWh/año. A medida que la electrificación avanza, esta demanda crece: con electrificación total, se multiplica aproximadamente por diez, hasta estabilizarse cerca de los 70.000 MWh/año. La electrificación parcial conduce a una demanda intermedia, del orden de los 54.000 MWh/año al final del horizonte. Este incremento es un requisito estructural de la estrategia: la viabilidad de la electrificación depende de que la infraestructura de recarga sea capaz de sostener esa demanda, cuya magnitud servirá de base para el dimensionamiento desarrollado en el capítulo siguiente.

En resumen, el escenario B demuestra que la electrificación es la única de las estrategias analizadas capaz de reducir simultáneamente los tres contaminantes de forma sustancial, atacando el CO₂ que la renovación no podía tocar y rompiendo el suelo de NO_x del parque

diésel. Al mismo tiempo, evidencia sus dos condicionantes: un residuo de emisiones irreductible ligado a la cadena de frío, y un fuerte aumento de la demanda energética que traslada el reto de la descarbonización desde el vehículo hacia la red y la infraestructura de recarga.

5.3 RESULTADOS DEL ESCENARIO C: COMPOSICIÓN DEL PARQUE

El escenario C evalúa la reorganización del parque mediante microhubs, sustituyendo la fracción de los vehículos grandes que opera en el centro urbano por combinaciones equivalentes en volumen de vehículos pequeños y eléctricos. Se compara con las estrategias de renovación a diésel (A) y electrificación total (B), para situar el microhub frente a las dos alternativas ya analizadas. La Figura 22 presenta la evolución de las emisiones y la Figura 23 la de la demanda de energía y el tamaño de la flota.

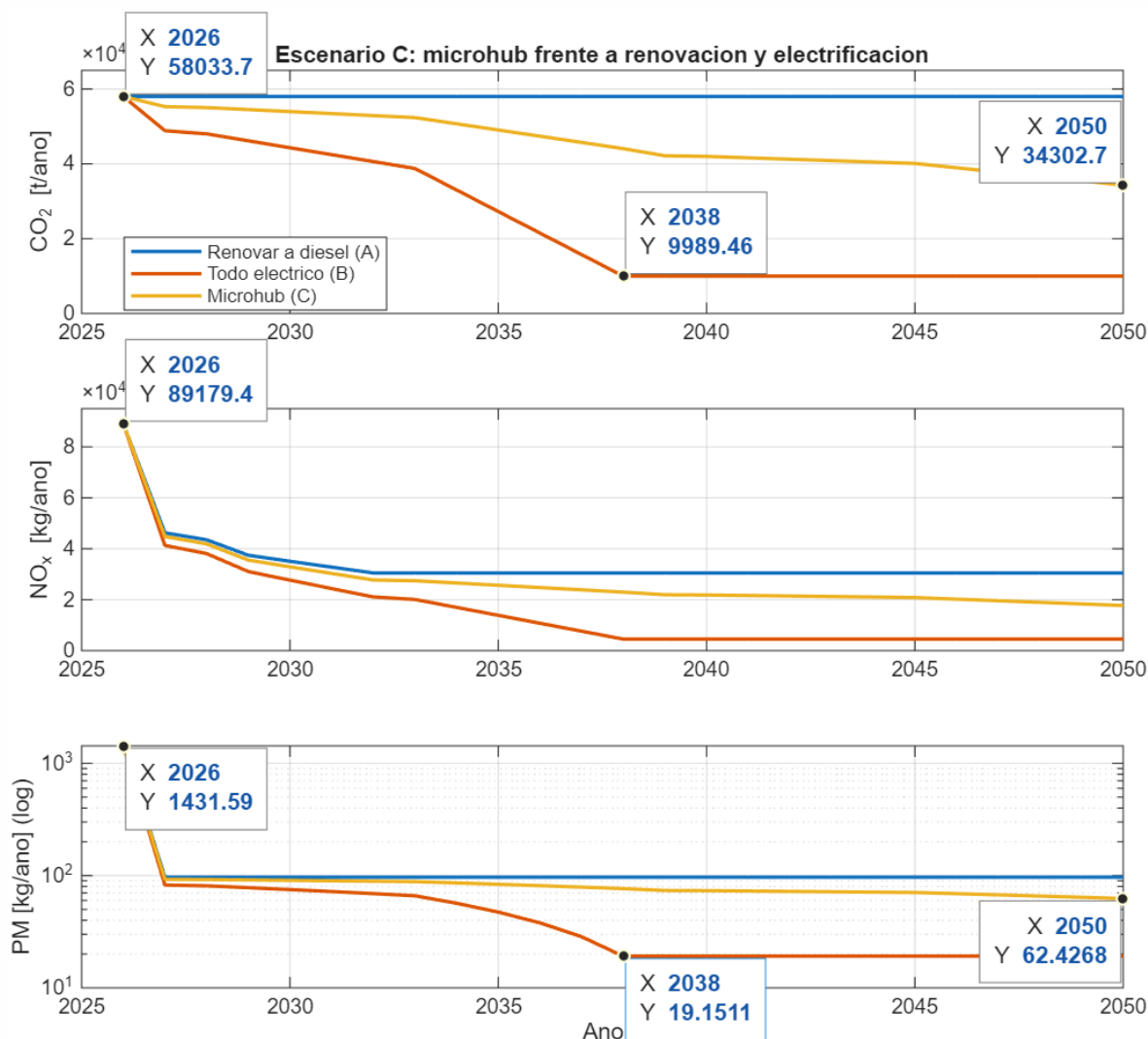


Figura 22: Panel de tres gráficas (CO₂, NO_x, PM) del escenario C - Fuente: elaboración propia

En cuanto a las emisiones, el microhub ocupa una posición intermedia entre la renovación a diésel y la electrificación total. El CO₂ desciende de las 58.000 t/año iniciales hasta unas 34.300 t/año en 2050, una reducción del orden del 41%, frente al 0% de la renovación a diésel y el 83% de la electrificación total. Los óxidos de nitrógeno y las partículas siguen la misma pauta, con reducciones sustanciales pero sin alcanzar los niveles de la electrificación

completa. Este comportamiento es coherente con la naturaleza de la medida: el microhub electrifica únicamente la fracción de la flota que opera en el centro, por lo que su beneficio ambiental es parcial, limitado a esa parte del reparto.

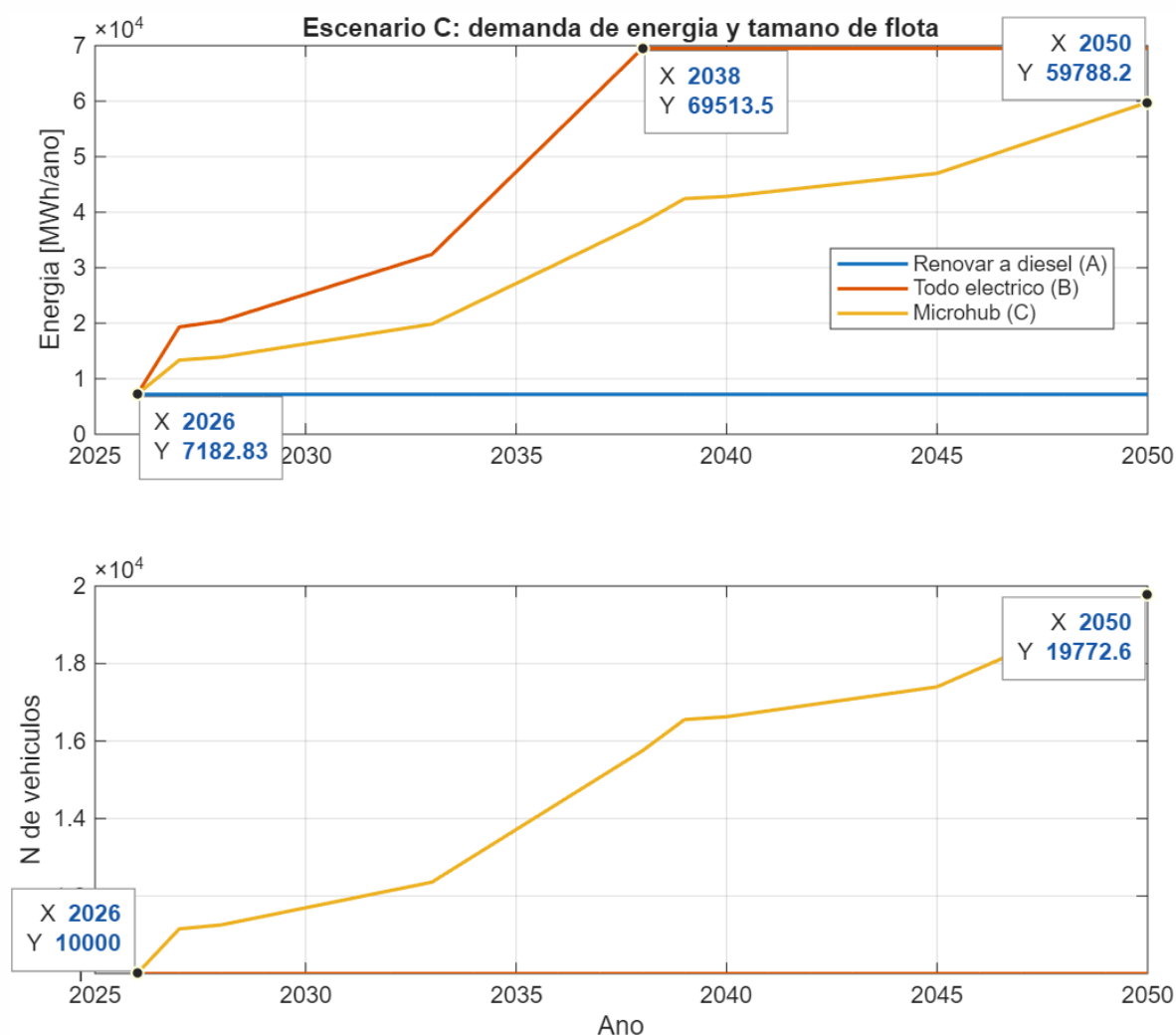


Figura 23: Gráficas de demanda de energía y de tamaño de la flota del escenario C -
Fuente: elaboración propia

Sin embargo, el resultado más revelador del escenario C no está en las emisiones, sino en las dos magnitudes que recoge la Figura 23. La primera es el tamaño de la flota, que crece de forma acusada a lo largo del horizonte: de los 10.000 vehículos iniciales a cerca de 19.800 en 2050, prácticamente el doble. Este crecimiento es la manifestación directa de la penalización por desconsolidación: al fragmentar la carga de un vehículo grande en varias unidades pequeñas, donde antes operaba un solo vehículo pasan a operar tres, o hasta diez en el caso de los camiones, para prestar el mismo servicio de reparto.

La segunda magnitud es la demanda de energía eléctrica, que asciende hasta unos 59.800 MWh/año en 2050. Este valor es especialmente significativo si se compara con el de la electrificación total: el microhub alcanza el 86% de la demanda energética de la estrategia B, a pesar de electrificar una fracción mucho menor de la flota. La explicación reside de

nuevo en la desconsolidación: el mayor número de vehículos, cada uno recorriendo la misma distancia anual, multiplica los kilómetros totales y, con ellos, el consumo energético.

De la comparación de estas magnitudes se extrae la conclusión central del escenario. El microhub no es una estrategia de descarbonización eficiente en sí misma: consigue una reducción de emisiones parcial, inferior a la de la electrificación directa, y lo hace a costa de un incremento notable del número de vehículos y de una demanda energética casi equivalente a la de electrificar toda la flota. Su valor, por tanto, no debe buscarse en la eficiencia, sino en la viabilidad: el microhub es la herramienta que permite el acceso de un reparto de cero emisiones a las zonas más restringidas del centro urbano, donde los vehículos de gran tamaño encuentran limitaciones de acceso y maniobra, aun cuando ello suponga un mayor consumo de recursos. El escenario C evidencia así el equilibrio que todo diseño de microhub debe gestionar: el beneficio de descarbonizar el reparto capilar del centro frente al coste, en vehículos, kilómetros y energía, de fragmentar la carga.

Capítulo 6. DIMENSIONAMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE RECARGA

6.1 PLANTEAMIENTO Y ALCANCE

El capítulo anterior ha demostrado que la electrificación es la única estrategia capaz de reducir de forma sustancial los tres contaminantes, pero también ha puesto de manifiesto su principal contrapartida: un fuerte incremento de la demanda de energía eléctrica, que en el escenario de electrificación total se estabiliza en torno a los 70.000 MWh/año. Ese resultado desplaza el reto de la descarbonización desde el vehículo hacia la red y, en particular, hacia la infraestructura encargada de reponer esa energía. Este capítulo aborda precisamente ese eslabón: cuántos puntos de recarga, de qué potencia y con qué potencia total se necesita para sostener la operación de una flota de última milla completamente electrificada.

El dimensionamiento parte del estado final del escenario B en su variante de electrificación total, por ser el caso más exigente de todos los simulados y, por tanto, el que fija el límite superior de la infraestructura necesaria. Cualquier grado de electrificación inferior, como la mezcla parcial, quedaría cubierto por la instalación así dimensionada. La energía que debe reponer la infraestructura no es un dato nuevo, sino la propia demanda calculada en el apartado 5.2: los kilómetros que recorre la flota y los consumos unitarios de cada tipo de vehículo determinan la energía diaria a reponer, que es la magnitud de entrada de todo el cálculo posterior.

Conviene precisar el alcance de lo que aquí se dimensiona. El escenario B representa la electrificación del conjunto del parque de última milla de la ciudad, un volumen de vehículos que excede con mucho la capacidad de una única instalación. Por ello, este capítulo no dimensiona un microhub concreto, sino la infraestructura de recarga agregada que requiere la flota electrificada en su conjunto: el número total de puntos de recarga y la potencia total asociada. Esta magnitud agregada constituye el "tamaño global del reto de recarga", que el capítulo siguiente, dedicado al microhub, distribuirá territorialmente entre depósitos y nodos logísticos en función de la ubicación y del reparto de la flota.

El dimensionamiento se apoya en la ventana temporal caracterizada en el apartado 3.5 Como se estableció, la flota opera en un bloque matinal de seis horas y permanece estacionada el resto del día, lo que deja un amplio margen para la reposición energética. Dentro de ese margen, el modelo asume que la recarga se concentra en la franja valle nocturna, comprendida entre las 0:00 y las 7:00 h, esto es, siete horas disponibles para cargar. Esta elección, justificada en el apartado 3.5 por el menor precio de la electricidad en horas valle, es también la hipótesis sobre la que se dimensiona la infraestructura: los cargadores y la potencia total se calculan para reponer la energía diaria de la flota dentro de esa ventana de siete horas.

Sobre esta base, el cálculo adopta un conjunto de hipótesis que conviene enunciar de antemano. En primer lugar, se asume un único ciclo de recarga por vehículo y noche: cada vehículo repone en una sola sesión nocturna la energía consumida durante su jornada, sin recargas intermedias a lo largo del día. En segundo lugar, la recarga se realiza en base o microhub, en un punto asignado al vehículo, y no se contempla la recarga de oportunidad en vía pública ni en destino. En tercer lugar, el dimensionamiento se plantea sobre la energía diaria realmente consumida, es decir, la que el vehículo necesita reponer para cubrir su ruta, y no sobre la recarga completa de la batería desde cero, criterio cuya justificación se desarrolla en el apartado siguiente al comprobar la relación entre el kilometraje diario y la autonomía de cada vehículo. Por último, quedan fuera del alcance de este análisis las estrategias de recarga bidireccional (V2G) y la gestión activa de la demanda mediante almacenamiento estacionario, que constituyen líneas de mejora posteriores y no condicionan el dimensionamiento base.

Con este planteamiento, el capítulo se organiza en cinco apartados. Tras este primero, dedicado al alcance y las hipótesis, el segundo recopila los datos de partida y comprueba que la autonomía de cada vehículo es compatible con una única recarga nocturna. El tercero expone la metodología de cálculo. El cuarto asigna a cada tipo de vehículo la clase de cargador adecuada. El quinto y último determina el número de puntos de recarga y la potencia total de la instalación, y cierra con una reflexión sobre la magnitud de esa potencia y su encaje en la curva de demanda eléctrica.

6.2 DATOS DE PARTIDA Y COMPROBACIÓN DE AUTONOMÍA

El dimensionamiento de la infraestructura de recarga se construye sobre un conjunto de datos que, en su mayor parte, se han definido y justificado en capítulos anteriores y que aquí se recuperan de forma sintética para fijar el punto de partida del cálculo. Son de tres tipos: los parámetros de operación de la flota, los parámetros energéticos de cada vehículo y la ventana de recarga disponible.

El primer parámetro es la distancia diaria recorrida por cada vehículo. Como se estableció en el apartado 4.2, la combinación de una velocidad efectiva de reparto de 15 km/h, una ventana de operación de seis horas diarias y 250 días operativos al año conduce a un recorrido de aproximadamente 22.500 km anuales por vehículo, equivalentes a 90 km diarios. Este valor se asume homogéneo para toda la flota, en coherencia con la ventana de operación única adoptada en el apartado 3.5. El segundo es la ventana de recarga: según lo caracterizado en ese mismo capítulo, la flota permanece estacionada desde las 13:00 h, pero la recarga se concentra en la franja valle nocturna comprendida entre las 0:00 y las 7:00 h, lo que deja siete horas efectivas para reponer la energía consumida durante la jornada.

El tercer conjunto de datos son los parámetros energéticos de cada tipo de vehículo eléctrico, tomados de la caracterización técnica del apartado 3.6.3: el consumo eléctrico urbano (kWh/100 km), la capacidad de la batería (kWh) y la autonomía (km). A partir del consumo y de la distancia diaria se obtiene la magnitud central de este capítulo, la energía que cada vehículo debe reponer cada noche, calculada como el producto del consumo unitario por los 90 km diarios. La Tabla 14 recoge estos valores para los cinco tipos de vehículo eléctrico que componen la flota electrificada.

Tabla 14: Energía diaria a reponer y fracción de batería por tipo de vehículo – Fuente: elaboración propia a partir del apartado 3.6.3

Tipo de vehículo	Consumo (kWh/100km)	Energía diaria a reponer (kWh)	Batería (kWh)	Autonomía (km)	Fracción de batería usada al día
Motos eléctricas	4,1	3,7	5,6	137	66%
Furgonetas eléctricas L1H1	22,7	20,4	50	220	41%
Furgones eléctricos L2H2	30,8	27,7	75	245	37%
Micro distribución eléctrica (Scoobic)	5,3	4,8	4,8	90	99%
Camiones eléctricos (16t)	106	95,4	265	250	36%

Nota: Energía diaria a reponer = consumo $\times$ 90 km / 100. Fracción de batería usada = energía diaria / capacidad de batería, que por construcción coincide con la relación entre los 90 km diarios y la autonomía del vehículo. Fuente: elaboración propia a partir del apartado 3.6.3.

Antes de dimensionar los cargadores conviene detenerse en la última columna de la tabla, que sustenta una de las hipótesis clave del capítulo: la de un único ciclo de recarga por noche. Para la mayor parte de la flota, la energía diaria representa una fracción modesta de la capacidad de la batería, entre el 36 % y el 41 % en furgonetas, furgones y camiones. Dicho de otro modo, estos vehículos recorren sus 90 km diarios consumiendo poco más de un tercio de su autonomía, de manera que no necesitan una recarga completa cada noche, sino únicamente reponer la energía del día. Esta observación es la que justifica dimensionar la infraestructura sobre la energía diaria consumida, y no sobre la carga íntegra de la batería desde cero: hacerlo sobre la batería completa sobredimensionaría la instalación en un factor de entre dos y tres respecto a la necesidad real, de forma incoherente con la operación efectiva de la flota. La recarga completa actúa, en todo caso, como cota superior teórica, no como criterio de diseño.

Las motocicletas eléctricas presentan una fracción algo mayor, del 66 %, todavía holgadamente cubierta por una sola sesión de recarga. El caso singular es el de la micro distribución (Scoobic), cuya batería de 4,8 kWh queda prácticamente agotada, al 99 %, tras los 90 km diarios. Este resultado, sin embargo, es consecuencia directa de aplicar la hipótesis de kilometraje homogéneo a un vehículo concebido para el tramo capilar final: en la operativa real de un microhub, el Scoobic cubre distancias muy inferiores a los 90 km, por lo que este valor debe interpretarse como un caso extremo conservador y no como su régimen habitual. Aun bajo esa hipótesis exigente, el vehículo completa su jornada con una única recarga nocturna, aunque sin apenas margen, lo que refuerza la conveniencia de reservar la

micro distribución para los recorridos cortos desde el hub, cuestión que se retoma en el capítulo del microhub.

Comprobada la compatibilidad de la operación con una sola recarga nocturna, resta fijar la magnitud agregada que la infraestructura debe reponer cada noche. La demanda anual del escenario de electrificación total, en torno a los 70.000 MWh/año (apartado 5.2), repartida entre los 250 días operativos, equivale a unos 280 MWh que la flota debe reponer cada noche dentro de la ventana valle. Esta energía diaria agregada constituye el dato de entrada sobre el que el apartado 6.3 desarrolla la metodología de dimensionamiento y del que, al distribuirlo en las siete horas de la ventana, se derivará la potencia total de la instalación.

6.3 METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO

Definidos los datos de partida, este apartado expone la cadena de cálculo que traduce la energía diaria que la flota debe reponer en las dos magnitudes que caracterizan la infraestructura de recarga: el número de puntos de recarga y la potencia total de la instalación. El procedimiento se desarrolla en dos niveles complementarios. El primero, de carácter unitario, dimensiona el cargador que requiere cada vehículo a partir de su energía diaria y de la ventana de recarga disponible. El segundo, de carácter agregado, escala ese resultado al conjunto de la flota e introduce el efecto del escalonamiento de las conexiones sobre la potencia que finalmente debe contratarse.

En el nivel unitario, el punto de partida es la energía diaria a reponer por cada tipo de vehículo, calculada en el apartado anterior como el producto del consumo unitario por los 90 km diarios. Esa energía debe entregarse dentro de la ventana valle de siete horas, lo que fija la potencia mínima que el cargador asignado a cada vehículo debe ser capaz de suministrar. Ahora bien, la energía que la instalación debe extraer de la red es superior a la que finalmente se almacena en la batería, debido a las pérdidas del proceso de carga, tanto en el propio cargador como en la conversión interna del vehículo. Para tenerlo en cuenta, la energía diaria se corrige mediante un rendimiento de carga, de modo que la potencia mínima del cargador se obtiene como la energía diaria dividida entre el producto de la ventana de recarga por ese rendimiento:

$$P_{min,i} = \frac{E_{diaria,i}}{t_{recarga} \cdot \eta} \quad (1)$$

Donde $P_{min,i}$ es la potencia mínima del cargador para el vehículo de tipo i , $E_{diaria,i}$ su energía diaria a reponer, $t_{recarga}$ la ventana de recarga (7 h) y η el rendimiento de carga.

Esta potencia mínima representa el valor teórico por debajo del cual el vehículo no llegaría a reponer su energía dentro de la ventana valle, pero no es todavía la potencia del cargador que se instala. La razón es que los puntos de recarga no se fabrican a medida de cada necesidad, sino en una gama discreta de potencias normalizadas. Por ello, a cada vehículo se le asigna el cargador comercial cuya potencia es inmediatamente superior a su potencia mínima, dentro del menú de potencias estándar que se detalla en el apartado siguiente. De esta asignación resulta, para cada tipo de vehículo, una potencia de cargador real que iguala o supera la mínima requerida y que, en consecuencia, permite reponer la energía diaria en un tiempo igual o inferior a las siete horas disponibles. Ese tiempo de recarga efectivo, obtenido como la energía diaria dividida entre la potencia real del cargador y el rendimiento, es el que después permite escalonar las conexiones a lo largo de la noche.

En el nivel agregado, el cálculo escala el resultado unitario al conjunto de la flota. El número de puntos de recarga se establece, en el caso base, mediante el criterio de un punto por vehículo: cada vehículo dispone de su propia plaza con cargador, hipótesis coherente con una recarga nocturna en la que la totalidad de la flota está estacionada de forma simultánea y prolongada. El número de puntos de cada clase de cargador coincide, por tanto, con el número de vehículos del tipo correspondiente. Sobre esta base, la potencia instalada sería la suma, para todos los vehículos, de la potencia del cargador que tiene asignado.

Esa potencia instalada, sin embargo, sobreestima la potencia que la instalación necesita realmente entregar en cada instante, porque supone que todos los vehículos cargan a la vez a plena potencia durante toda la ventana. La realidad operativa es distinta: dado que la mayoría de los vehículos requieren bastante menos de siete horas para reponer su energía diaria, sus sesiones de carga pueden distribuirse a lo largo de la franja nocturna en lugar de solaparse. Este escalonamiento se recoge mediante un factor de simultaneidad, comprendido entre cero y uno, que refleja la fracción de la flota que carga de forma efectivamente simultánea en el instante de mayor demanda. La potencia de diseño de la instalación se obtiene entonces afectando la potencia instalada bruta por ese factor:

$$P_{diseño} = f_{sim} \cdot \sum N_i \cdot P_{cargador,i} \quad (2)$$

Donde $P_{diseño}$ es la potencia de diseño de la instalación, f_{sim} el factor de simultaneidad, N_i el número de vehículos y por tanto de puntos del tipo i y $P_{cargador,i}$, la potencia del cargador que tienen asignado.

El factor de simultaneidad no es un parámetro arbitrario, sino que está acotado inferiormente por una magnitud física con sentido propio. Por muy escalonadas que estén las conexiones, la instalación debe entregar como mínimo la potencia que permite reponer la energía diaria total de la flota dentro de la ventana valle. Esa potencia media, obtenida como la energía diaria dividida entre las siete horas de la franja, constituye el suelo físico de potencia de la instalación: el valor por debajo del cual sería imposible reponer toda la energía en el tiempo disponible, con independencia de cómo se organicen las conexiones. El objetivo de una gestión de recarga bien diseñada es, precisamente, aplanar el perfil de demanda a lo largo de la noche para acercar la potencia de diseño a ese suelo físico, minimizando la potencia que debe contratarse. Este suelo actúa, así como referencia de contraste de los resultados del apartado 5.2 y como criterio para valorar la calidad del escalonamiento.

El factor de simultaneidad no es únicamente un parámetro de diseño, sino que cuenta con respaldo normativo. La instrucción ITC-BT-52 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, aprobada por el Real Decreto 1053/2014, contempla la instalación de un Sistema de Protección de la Línea general de alimentación (SPL), que evita la sobrecarga de la instalación reduciendo momentáneamente la potencia destinada a la recarga, ya sea desconectando puntos o regulando la intensidad de carga. Se trata, en esencia, del mismo mecanismo de gestión escalonada que aquí se plantea. La norma reconoce su efecto de forma explícita: cuando se instala un SPL, el dimensionamiento de las instalaciones de enlace se realiza aplicando a las cargas de recarga un factor de simultaneidad de 0,3, frente al valor de 1,0 exigido cuando no existe tal sistema [46]. Dicho de otro modo, la propia normativa admite que una instalación gestionada demanda en la práctica en torno a un tercio de su potencia instalada bruta, lo que confirma la validez del enfoque adoptado.

En síntesis, la metodología procede en cinco pasos encadenados: cálculo de la energía diaria por vehículo (apartado 6.2), obtención de su potencia mínima de cargador mediante la ecuación (1), asignación del cargador comercial normalizado inmediatamente superior (apartado 6.4), recuento de puntos por el criterio de un punto por vehículo y, finalmente, agregación de la potencia con la ecuación (2) y contraste frente al suelo físico de potencia. Los dos parámetros que la metodología deja abiertos, el rendimiento de carga y el factor de simultaneidad, se fijan con sus valores concretos en los apartados donde intervienen, justificándolos en cada caso.

6.4 SELECCIÓN DE CARGADORES POR TIPO DE VEHÍCULO

Establecida la metodología, este apartado asigna a cada tipo de vehículo la clase de cargador que le corresponde. La asignación parte de la potencia mínima teórica de cada vehículo, obtenida mediante la ecuación (1) a partir de su energía diaria y de la ventana de recarga de siete horas, y elige el escalón de potencia comercial inmediatamente superior. El rendimiento de carga se fija en $\eta = 0,90$, valor representativo de las pérdidas conjuntas del cargador y del convertidor de a bordo del vehículo en recarga en corriente alterna.

Los escalones de potencia disponibles no son continuos, sino que responden a los niveles normalizados de recarga que recoge la norma IEC 61851 [11]. En corriente alterna, los valores de referencia para la recarga en base son 7,4 kW en instalación monofásica (32 A a 230 V) y 11 o 22 kW en instalación trifásica (16 o 32 A a 400 V). Por encima de estos valores se sitúa la recarga rápida en corriente continua, que entrega la energía directamente a la batería sin pasar por el convertidor de a bordo del vehículo y cuyo escalón comercial de entrada se encuentra en el entorno de los 50 kW. Sobre esta gama se construye el menú de cargadores del proyecto, seleccionando en cada caso la opción de menor potencia capaz de reponer la energía diaria del vehículo dentro de la ventana valle.

La potencia mínima teórica confirma que la operación es, en todos los casos, de recarga lenta. El vehículo más exigente en términos absolutos, el camión de 16 toneladas, requiere reponer 95,4 kWh, lo que con la ventana de siete horas y el rendimiento del 90 % arroja una potencia mínima de unos 15 kW; el resto de la flota se sitúa por debajo de los 5 kW. Son valores muy bajos, consecuencia directa de disponer de siete horas para reponer una energía diaria modesta. Esta holgura es la que permite cubrir prácticamente toda la flota con recarga en corriente alterna, reservando la corriente continua para un único caso: la recarga del camión de 16 toneladas.

Sobre esta base, la asignación de cargadores queda como sigue. Las motocicletas eléctricas y los vehículos de micro distribución (Scoobic), con potencias mínimas del orden de 0,6 y 0,8 kW, se asignan al escalón de 7,4 kW en corriente alterna, el menor de la gama, que reponen su energía diaria en menos de una hora. Las furgonetas ligeras L1H1, con una potencia mínima en torno a 3,2 kW, se asignan igualmente a un punto de 7,4 kW en corriente alterna, suficiente para reponer sus 20,4 kWh en unas tres horas. Los furgones L2H2, con una potencia mínima cercana a 4,4 kW, se asignan a un cargador de 11 kW en corriente alterna, que les permite reponer sus 27,7 kWh en menos de tres horas con margen sobrado. El camión de 16 toneladas es el único caso que, por su energía diaria de 95,4 kWh, no se cubre cómodamente con corriente alterna dentro de la ventana: se le asigna un cargador de recarga rápida en corriente continua de 50 kW, con el que repone su energía diaria en algo más de dos horas. La Tabla 15 resume esta asignación, junto con el tiempo de recarga efectivo resultante en cada caso.

Tabla 15: Asignación de cargador y tiempo de recarga por tipo de vehículo – Fuente: elaboración propia; escalones de potencia según IEC 61851 [11]

Tipo de vehículo	Energía diaria (kWh)	Potencia mínima teórica (kW)	Cargador asignado	Tiempo de recarga efectivo (h)
Motos eléctricas	3,7	0,6	AC 7,4 kW	0,6
Micro distribución eléctrica (Scoobic)	4,8	4,8	AC 7,4 kW	0,7
Furgonetas eléctricas L1H1	20,4	3,2	AC 7,4 kW	3,1
Furgones eléctricos L2H2	27,7	4,4	AC 11 kW	2,8
Camiones eléctricos (16t)	95,4	15,1	DC 50 kW	2,1

Nota: Potencia mínima teórica = energía diaria / (7 h × 0,90). Tiempo de recarga efectivo = energía diaria / (potencia del cargador × 0,90). Fuente: elaboración propia; escalones de potencia según IEC 61851 [X].

Dos observaciones cierran la asignación. La primera es que, salvo el camión, toda la flota se recarga en corriente alterna con los dos escalones más bajos de la gama (7,4 y 11 kW), lo que confirma el carácter de recarga lenta nocturna de la operación y se traduce en una infraestructura sencilla y de bajo coste unitario por punto. La segunda se refiere al cargador rápido en corriente continua asignado al camión: bajo las hipótesis del modelo (90 km diarios y un único ciclo de recarga por noche), un punto en corriente alterna de mayor potencia bastaría para reponer su energía diaria en la ventana valle. No obstante, se ha optado por dotar a este vehículo de recarga rápida en corriente continua para disponer de un margen de respaldo: la capacidad de reponer una carga sustancial en un tiempo reducido permite atender eventuales dobles rutas o incidencias operativas sin comprometer el servicio, una flexibilidad que los tiempos de recarga en corriente alterna no ofrecerían para un vehículo con una batería de 265 kWh. Este cargador rápido es, por tanto, una decisión de diseño orientada a la robustez de la operación, y no una necesidad impuesta por el régimen nominal de recarga. Conviene señalar, por último, una consideración de diseño eléctrico: dado que los puntos de 7,4 kW son monofásicos, en una instalación con numerosos puntos de este tipo deberán repartirse de forma equilibrada entre las tres fases de la red, tal como recomienda la instrucción ITC-BT-52 [11], para evitar desequilibrios de carga. Esta distribución no altera la potencia total de la instalación, sino únicamente su reparto entre fases.

6.5 PUNTOS DE RECARGA, POTENCIA TOTAL E IMPLICACIONES

Asignados los cargadores, este último apartado agrega el resultado al conjunto de la flota para obtener las dos magnitudes que cierran el dimensionamiento: el número de puntos de recarga y la potencia de la instalación. El cálculo aplica la ecuación (2) y contrasta el resultado con el suelo físico de potencia definido en el apartado 6.3.

El número de puntos de recarga se establece, según el criterio de un punto por vehículo justificado en la metodología, igualando el número de puntos de cada clase de cargador al número de vehículos del tipo correspondiente. Dado que el modelo trabaja con una flota representativa de tamaño escalable (apartado 4.2), el número absoluto de puntos es igualmente escalable: se obtiene aplicando al tamaño de flota que se adopte las proporciones por tipo de vehículo de la flota electrificada. Lo que sí queda determinado con independencia del tamaño es el reparto de puntos por clase de cargador, que reproduce la composición de la flota: mayoritariamente puntos de corriente alterna de 7,4 y 11 kW, y una fracción minoritaria de puntos de corriente continua asociada a los camiones.

La potencia de la instalación, en cambio, puede fijarse en términos absolutos sin necesidad de fijar el tamaño de la flota, anclándola directamente en la demanda energética validada en el capítulo anterior. La energía que la flota electrificada debe reponer cada noche, obtenida al repartir los aproximadamente 70.000 MWh/año del escenario de electrificación total entre los 250 días operativos, asciende a unos 280 MWh diarios (apartado 6.2). Distribuida en las siete horas de la ventana valle, esta energía fija el suelo físico de potencia de la instalación:

$$P_{\text{suelo}} = \frac{280 \text{ MWh}}{7 \text{ h}} \approx 40 \text{ MW} \quad (3)$$

Este valor de unos 40 MW representa la potencia media que la instalación debe entregar de forma sostenida a lo largo de la ventana valle para reponer toda la energía diaria de la flota. Es, por construcción, el mínimo teórico: ninguna organización de las recargas permite bajar de él, porque corresponde a la energía total que necesariamente debe trasvasarse en el tiempo disponible. La potencia de diseño real dependerá de cómo se distribuyan las conexiones a lo largo de la noche, esto es, del factor de simultaneidad.

Conviene precisar, antes de continuar, la naturaleza de esta cifra. Los 40 MW no constituyen la potencia real que demandaría la última milla de Madrid, sino la que corresponde a la flota representativa adoptada, y heredan por tanto el mismo carácter escalable que la demanda energética de la que proceden (apartado 4.2). Lo que el dimensionamiento fija con independencia del tamaño de la flota no es el valor absoluto, sino la regla que lo genera: la potencia agregada equivale a la energía anual electrificada dividida entre los días operativos y las horas de la ventana de recarga. Aplicada a cualquier tamaño de flota, incluida la flota real de Madrid una vez se conozca su número exacto de vehículos, esta relación proporciona la potencia correspondiente. El valor de 40 MW debe leerse, en consecuencia, como el resultado ilustrativo de aplicar esa regla a la flota del modelo, y no como una estimación censal.

Hecha esta salvedad, los tiempos de recarga efectivos calculados en el apartado 6.4 resultan determinantes para pasar del suelo teórico a la potencia de diseño. Ninguno de los tipos de

vehículo necesita más de unas tres horas para reponer su energía diaria, frente a las siete horas de ventana disponible. Esta holgura, superior al doble del tiempo de carga más largo, permite escalonar las conexiones en lugar de solaparlas: no es necesario que todos los vehículos carguen simultáneamente, sino que sus sesiones pueden distribuirse en tandas sucesivas a lo largo de la franja nocturna. Un sistema de gestión de recarga que reparta las conexiones de este modo aproxima la potencia de diseño al suelo físico calculado, en lugar de a la potencia instalada bruta que resultaría de suponer todos los puntos activos a la vez. En el límite de un escalonamiento perfecto, la potencia a contratar se acercaría a ese suelo; en la práctica, un margen de seguridad sobre esa cifra cubre las holguras de la operación real. Esta es, precisamente, la ventaja de recargar en una ventana amplia con cargadores de potencia moderada anticipada en el apartado 3.5: convierte un pico de demanda potencialmente elevado en una carga sostenida y gestionable.

Cabe interpretar también el orden de magnitud de esta potencia, con la salvedad ya hecha de su carácter escalable. Referida a la flota del modelo, una potencia del orden de decenas de megavatios es equiparable a la de una subestación de distribución de tamaño medio, lo que confirma que la electrificación completa de la última milla no es un consumo menor y que su viabilidad exige coordinación con la red de distribución y, muy probablemente, infraestructura eléctrica dedicada. No se trata, sin embargo, de una potencia concentrada en un único punto: repartida entre los distintos depósitos y microhubs en que se distribuya físicamente la flota (cuestión que aborda el capítulo siguiente), la potencia por emplazamiento se reduce a valores propios de una acometida industrial ordinaria. Esta descomposición territorial es, además, independiente del tamaño total de la flota, ya que opera sobre la potencia por punto de recarga, que sí es una magnitud tangible y fijada por el tipo de cargador.

Implicación sobre la curva de demanda eléctrica:

Más allá de su magnitud, la ubicación temporal de esta carga tiene una implicación favorable para el sistema eléctrico que conviene destacar. Al concentrarse la recarga en la franja valle nocturna, la demanda de la flota no se superpone a los picos de consumo del sistema, que se producen en las horas centrales y en la tarde-noche, sino que se sitúa en el tramo de menor demanda de la curva diaria. De este modo, la electrificación de la última milla contribuye a aplanar la curva de demanda, rellenando el valle nocturno con una carga que aprovecha la capacidad de generación y de red ociosa en esas horas, en lugar de agravar los momentos de máxima solicitud. Esta coincidencia entre el criterio económico que motiva la recarga en valle y el beneficio para el sistema refuerza la conveniencia de la estrategia adoptada.

No obstante, cuantificar con precisión el impacto de esta carga sobre la curva de demanda de Madrid o del conjunto del sistema peninsular requeriría fijar el tamaño absoluto de la flota real de última milla y contrastarlo con las curvas de demanda del operador del sistema, un análisis que excede el alcance del presente dimensionamiento, planteado en términos de flota representativa y resultados escalables. Se apunta, por tanto, como línea de trabajo futura, en la que el valor de potencia agregada aquí obtenido serviría de punto de partida para evaluar el encaje de la recarga de la última milla en la operación del sistema eléctrico.

Capítulo 7. MODELO Y DIMENSIONAMIENTO DEL MICROHUB

7.1 PLANTEAMIENTO Y ALCANCE

El escenario C de la simulación exploró una vía de descarbonización distinta a la mera sustitución tecnológica: en lugar de reemplazar cada vehículo por su equivalente eléctrico, planteó reorganizar la composición del parque, descomponiendo los vehículos de gran capacidad que acceden al centro urbano en un conjunto de vehículos menores y de cero emisiones capaces de prestar el mismo servicio de reparto. Los resultados de ese escenario cuantificaron el balance de la medida: la reducción de emisiones que aporta introducir vehículos limpios en el centro, y la penalización, en número de vehículos y en kilómetros recorridos, que impone fragmentar la carga. Lo que aquel capítulo no abordó es el elemento físico que hace posible esa ruptura de carga. Ese es el objeto del presente capítulo: el microhub.

Un microhub es, en el marco de este proyecto, una instalación logística de proximidad situada en el interior o en el borde de la zona de bajas emisiones, en la que la mercancía que llega consolidada en vehículos de gran capacidad se transfiere a vehículos de reparto capilar de cero emisiones, encargados de la entrega final. Su función es, por tanto, doble: actúa como punto de ruptura de carga, evitando que los vehículos pesados penetren en el centro, y como base de operación y recarga de la flota capilar que opera desde él. Esta segunda función lo conecta directamente con el capítulo anterior, ya que el microhub es uno de los emplazamientos en los que se materializa la infraestructura de recarga allí dimensionada de forma agregada.

El presente capítulo desarrolla, en consecuencia, el modelo físico del microhub y su dimensionado. No repite el análisis de impacto ambiental de la medida, que corresponde a los resultados del escenario C (apartado 5.3), sino que responde a las preguntas que aquel deja abiertas: dónde se ubica la instalación, qué volumen de mercancía maneja, cuántos vehículos capilares operan desde ella, qué superficie y qué instalaciones requiere y con qué potencia eléctrica debe contar. Se aborda, en definitiva, el cómo de la ruptura de carga.

Tres decisiones de alcance delimitan el análisis. La primera es que se dimensiona un microhub de referencia, y no la red completa de microhubs que requeriría la totalidad del centro urbano. El objetivo es caracterizar en detalle una instalación tipo, que sirva como unidad de diseño replicable; el capítulo concluye indicando cómo escalaría el resultado a una red. La segunda decisión es que el microhub se dimensiona a partir de una cuota de servicio, esto es, de la fracción del volumen de mercancía del centro que se le asigna, definida como parámetro. Esta elección mantiene la coherencia con el criterio de flota representativa y resultados escalables adoptado en el modelo de simulación (apartado 4.2): fijada la cuota, todas las magnitudes del microhub quedan determinadas, y variarla permite obtener instalaciones de mayor o menor tamaño sin alterar la metodología.

La tercera decisión se refiere a la propia arquitectura de la operación y merece una justificación específica, pues condiciona el esquema de implantación. La estrategia Madrid 360 ha impulsado la reconversión de aparcamientos subterráneos en nodos logísticos, siendo el microhub del parking de la Plaza Mayor su referente principal [8]. Ahora bien, los aparcamientos subterráneos presentan una restricción física insalvable para la mercancía consolidada: su gálibo, con alturas libres del orden de dos metros, es incompatible con la entrada de los vehículos que alimentan el microhub, ya se trate de furgones de gran volumen o de camiones rígidos. Por este motivo, el modelo adopta una arquitectura en dos niveles: el vehículo consolidado no accede al interior de la instalación, sino que realiza la descarga en superficie, en una zona de carga y descarga habilitada junto al acceso del aparcamiento, desde la que la mercancía se traslada al interior; el subterráneo aloja únicamente la zona de clasificación, las plazas de la flota capilar y su infraestructura de recarga, vehículos todos ellos de dimensiones compatibles con el gálibo disponible. Esta configuración, además de ser la única físicamente viable, reproduce el modo de operación de las experiencias reales de microhub subterráneo en la ciudad.

Quedan fuera del alcance de este capítulo los aspectos operativos y de gestión de la instalación, tales como los sistemas de información, la planificación de rutas de la flota capilar o el modelo de explotación y titularidad del microhub, que constituyen líneas de desarrollo posteriores y no condicionan el dimensionado físico aquí planteado.

Con este planteamiento, el capítulo se estructura en cinco apartados. Tras este primero, dedicado al alcance, el segundo justifica el emplazamiento de referencia. El tercero desarrolla el dimensionado funcional de la instalación, desde el volumen de mercancía hasta la superficie y el número de vehículos. El cuarto aterriza la infraestructura de recarga del capítulo anterior a la escala del microhub. El quinto y último presenta el esquema de implantación resultante.

7.2 EMPLAZAMIENTO DE REFERENCIA

El dimensionado de un microhub exige anclarlo a un emplazamiento concreto, ya que su superficie disponible y su gálibo condicionan directamente el número de vehículos que puede alojar y el volumen de mercancía que puede manejar. Este apartado justifica el emplazamiento adoptado como referencia y los criterios que sustentan esa elección.

El modelo adopta como referencia un aparcamiento subterráneo del Distrito Centro de Madrid, tomando como caso el del parking de la Plaza Mayor. La elección responde a que se trata del precedente real y operativo de esta tipología en la ciudad: como se expuso en el estado de la técnica, la estrategia Madrid 360 impulsó la reconversión de infraestructuras subterráneas en nodos logísticos, y el microhub de la Plaza Mayor, inaugurado en el marco del proyecto LEAD, constituye su referente principal, con una operativa basada en la entrega capilar mediante vehículos eléctricos [8]. Dimensionar sobre un emplazamiento con precedente contrastado, en lugar de sobre una ubicación hipotética, refuerza la verosimilitud del modelo y permite apoyarse en una configuración cuya viabilidad urbanística y operativa ya ha sido validada en la práctica.

Cuatro criterios hacen de esta tipología una ubicación idónea. El primero es la localización: se sitúa en el corazón del Distrito Centro, dentro de la Zona de Bajas Emisiones, precisamente donde las restricciones de acceso hacen necesaria la ruptura de carga y donde la densidad de destinos es máxima, lo que reduce la distancia media de las rutas capilares y, con ella, la penalización en kilómetros que el escenario C asocia a la desconsolidación. El segundo es el aprovechamiento de infraestructura existente: el uso de un aparcamiento en servicio evita construir una instalación logística de nueva planta en un entorno urbano consolidado, donde el suelo es escaso y costoso. El tercero es la disponibilidad de conexión eléctrica, determinante para la función de base de recarga de la flota capilar que el microhub debe cumplir. El cuarto es la accesibilidad desde el viario principal, que permite la llegada del vehículo consolidado hasta las inmediaciones de la instalación.

Este último criterio debe entenderse con la salvedad expuesta en el apartado anterior: la accesibilidad se refiere a la llegada del vehículo consolidado a la superficie, no a su entrada en el subterráneo, cuyo gálibo es incompatible con la altura de furgones de gran volumen y camiones rígidos. La descarga se resuelve así en una zona habilitada en superficie, desde la que la mercancía desciende al interior. La disponibilidad de espacio en el viario adyacente para habilitar esa zona de transferencia constituye, por tanto, un requisito adicional del emplazamiento, y se incorpora al esquema de implantación del apartado 7.5.

Conviene precisar, por último, el estatuto de este emplazamiento. El microhub aquí dimensionado no pretende ser un proyecto de ejecución del parking de la Plaza Mayor, sino una instalación tipo: un microhub representativo de los que integrarían la red del centro de Madrid, dimensionado sobre las condiciones de un emplazamiento real y replicable en los restantes aparcamientos subterráneos del distrito que reúnan los mismos criterios. Esta condición de unidad de diseño replicable es la que permite, en el cierre del capítulo, escalar el resultado a la red de microhubs necesaria para atender la totalidad del volumen de mercancía que accede al centro.

7.3 DIMENSIONAMIENTO DEL MICROHUB

Definido el emplazamiento, este apartado dimensiona la instalación. El cálculo procede desde el volumen de mercancía que el microhub maneja hasta las magnitudes físicas que lo caracterizan: los vehículos consolidados que lo alimentan, la flota capilar que opera desde él y la superficie que requiere. La cadena de cálculo se apoya en los volúmenes de carga de cada tipo de vehículo caracterizados en el apartado 3.6.3 y aplica la misma regla de equivalencia por volumen que emplea el escenario C, de modo que el microhub aquí dimensionado materialice físicamente la medida que aquel escenario simula.

Vehículos admitidos

El microhub recibe los dos tipos de vehículo de gran capacidad que el escenario C identifica como candidatos a la ruptura de carga: el furgón diésel L2H2, de 9,5 m³ de volumen útil, característico de la paquetería, y el camión rígido diésel, de aproximadamente 35 m³, propio del abastecimiento de carga seca al canal HORECA (bebidas y alimentación no perecedera).

Quedan excluidos, en cambio, los vehículos frigoríficos, en coherencia con el criterio adoptado en los escenarios B y C. La razón es la misma que allí se expuso, y en el caso del microhub resulta aún más determinante: fragmentar la cadena de frío en unidades pequeñas exigiría dotar a la instalación de cámaras refrigeradas y a la flota capilar de equipos de frío autónomos, lo que un aparcamiento subterráneo reconvertido no puede ofrecer. La mercancía que requiere temperatura controlada continúa, por tanto, distribuyéndose mediante vehículos frigoríficos convencionales, al margen del microhub. Esta exclusión no es una limitación del emplazamiento, sino la manifestación física de la barrera que el capítulo de resultados ya había identificado como el eslabón irreductible de la descarbonización de la última milla.

Cuota de servicio

El microhub se dimensiona a partir de una cuota de servicio, definida como el volumen de mercancía que la instalación gestiona diariamente. Se adopta como parámetro de diseño una cuota del orden de 210 m³/día. Este valor no es arbitrario: se ha fijado a partir de la capacidad física del emplazamiento de referencia, de modo que la flota capilar resultante y su zona de operación quepan en una planta de un aparcamiento subterráneo urbano, según se comprueba al final de este apartado. La cuota constituye, por tanto, el parámetro que liga la operación logística con la capacidad del contenedor físico disponible, y opera como variable de escala: fijada la cuota, todas las magnitudes del microhub quedan determinadas, y el número de microhubs necesarios para atender el conjunto del centro se obtiene como resultado, no como hipótesis.

Esa cuota se materializa en un número entero de vehículos consolidados, repartidos entre los dos tipos admitidos en proporción al volumen que cada uno aporta a la flota de última milla: los furgones L2H2, mayoritarios en número, concentran en torno a dos tercios del volumen transportado por los vehículos descomponibles, y los camiones rígidos, menos numerosos, pero de mucha mayor capacidad unitaria, el tercio restante. De este reparto resultan 15 furgones L2H2 y 2 camiones rígidos que acceden diariamente al microhub, los cuales transportan un volumen conjunto de 212,5 m³, valor que fija de forma exacta la cuota de

servicio de la instalación. Distribuidos en la ventana de operación matinal (apartado 3.5), estos diecisiete vehículos suponen del orden de tres descargas por hora, una frecuencia asumible para una única zona de carga y descarga en superficie y que no genera colas significativas en el viario adyacente.

Flota saliente

La ruptura de carga transfiere ese volumen a vehículos de reparto capilar de cero emisiones, aplicando las combinaciones de equivalencia definidas en el escenario C (apartado 4.3.3), que igualan el volumen de carga del vehículo sustituido:

- Cada furgón L2H2 se descompone en 2 furgonetas eléctricas L1H1 y 1 vehículo de micro distribución ($2 \times 3,85 + 2,2 = 9,9 \text{ m}^3 \approx 9,5 \text{ m}^3$);
- Cada camión rígido se descompone en 8 furgonetas eléctricas L1H1 y 2 vehículos de micro distribución ($8 \times 3,85 + 2 \times 2,2 = 35,2 \text{ m}^3 \approx 35 \text{ m}^3$).

Aplicadas a los diecisiete vehículos consolidados entrantes, estas combinaciones arrojan una flota capilar de 46 furgonetas eléctricas L1H1 y 19 vehículos de micro distribución, esto es, 65 vehículos que operan desde el microhub. La Tabla 16 recoge el detalle del cálculo.

Tabla 16: Dimensionado funcional del microhub de referencia – Fuente: elaboración propia

	Furgones L2H2	Camiones rígidos	Total
Vehículos entrantes	15	2	17
Volumen unitario (m ³)	9,5	35,0	-
Volumen transportado (m³/día)	142,5	70,0	212,5
Descomposición	2 L1H1 + 1 micro	8 L1H1 + 2 micro	-
Furgonetas eléctricas L1H1	30	16	46
Micro distribución eléctrica	15	4	19
Flota capilar total	45	20	65

El resultado ilustra físicamente la penalización por desconsolidación que el escenario C cuantifica a escala de flota: diecisiete vehículos pesados que dejan de circular por el centro se transforman en sesenta y cinco vehículos ligeros, un multiplicador cercano a cuatro. El microhub elimina las emisiones directas del reparto en el centro, pero a costa de multiplicar el número de vehículos en circulación, con el consiguiente incremento de los kilómetros totales recorridos y de la ocupación del viario.

El cálculo asume un único ciclo de carga y reparto por vehículo y día, en coherencia con el escenario C, que no contempla rotaciones múltiples de la flota capilar. Se trata de una

hipótesis conservadora: en la operación real, un vehículo de micro distribución podría completar varias rotaciones desde el hub dentro de la ventana matinal, dado el corto recorrido de sus rutas, lo que reduciría el tamaño de la flota necesaria y, con ella, tanto la superficie del microhub como su penalización en vehículos. Mantener la hipótesis de una rotación preserva la coherencia con los resultados de emisiones ya obtenidos y sitúa el dimensionado del lado de la seguridad.

Superficie requerida

La superficie del microhub se obtiene sumando las cinco zonas funcionales que componen la instalación, dimensionadas cada una según el criterio que le corresponde.

Las plazas de estacionamiento y recarga de la flota capilar constituyen la partida principal. Adoptando una plaza estándar de 11,5 m² (2,4 × 4,8 m) para las furgonetas L1H1 y una plaza reducida de 6 m² para los vehículos de micro distribución, acorde con sus dimensiones, las 46 furgonetas ocupan 529 m² y los 19 vehículos de micro distribución 114 m², lo que arroja un subtotal de 643 m². La zona de clasificación es donde se materializa la ruptura de carga, y se dimensiona a partir del volumen de mercancía que debe alojar. Los 212,5 m³ diarios, apilados en una altura útil de 1,8 m (compatible con el gálibo del subterráneo y con la manipulación mediante transpaletas) y con un factor de ocupación del suelo del 55 %, que reserva el espacio necesario para los pasillos internos de clasificación, requieren una superficie de 215 m².

La zona de recepción y de descarga, situada al pie de la rampa o del montacargas, acoge la mercancía que desciende desde la superficie antes de ser clasificada. Se dimensiona como un pulmón equivalente al 30 % de la zona de clasificación, suficiente para absorber el desfase entre la llegada de los vehículos consolidados y el ritmo de procesamiento, lo que supone 64 m². Los pasillos de circulación y maniobra permiten el acceso de la flota capilar a sus plazas. Considerando un pasillo de maniobra de aproximadamente 5 m entre filas de plazas, valor habitual en aparcamientos, esta superficie asciende al 45 % de la ocupada por las plazas, esto es, 289 m².

Finalmente, se reserva una superficie de 40 m² para servicios: el cuadro eléctrico y la acometida de la instalación de recarga, un puesto de control y los aseos del personal.

Tabla 17: Desglose de la superficie requerida por el microhub de referencia - Fuente: elaboración propia

Zona	Criterio de dimensionamiento	Superficie (m²)
Plazas de furgonetas L1H1	46 plazas × 11,5 m ²	529
Plazas de micro distribución	19 plazas × 6,0 m ²	114
Recepción y clasificación	212,5 m ³ / 1,8 m altura / 55 % ocupación	215
Descarga	30 % de la zona de clasificación	64
Circulación y maniobra	45 % de la superficie de plazas	289
Servicios (cuadro eléctrico, control, aseos)	Estimación	40
TOTAL		1.251

La superficie total requerida asciende, por tanto, a unos 1.250 m². Esta cifra es la que valida la cuota de servicio adoptada: una superficie del orden de mil doscientos metros cuadrados es compatible con la ocupación de una planta de un aparcamiento subterráneo urbano, sin necesidad de reconvertir la totalidad de la instalación ni de recurrir a obra de nueva planta. La cuota adoptada queda así justificada no como una elección arbitraria, sino como el volumen que un emplazamiento de la tipología seleccionada es capaz de absorber. Una cuota sensiblemente superior desbordaría la capacidad física del aparcamiento, mientras que una notablemente inferior infrautilizaría la instalación y multiplicaría innecesariamente el número de microhubs de la red.

7.4 INFRAESTRUCTURA DE RECARGA DEL MICROHUB

Además de punto de ruptura de carga, el microhub actúa como base de operación y recarga de la flota capilar que opera desde él. Este apartado dimensiona su infraestructura de recarga aplicando a la flota obtenida en el apartado anterior la metodología desarrollada en el Capítulo 6. , y permite comprobar a escala de emplazamiento la afirmación allí anticipada: que la potencia agregada de la electrificación, al repartirse territorialmente, se traduce en acometidas de magnitud ordinaria.

Energía diaria y puntos de recarga

La flota capilar del microhub está compuesta por 46 furgonetas eléctricas L1H1 y 19 vehículos de micro distribución. Aplicando los consumos unitarios caracterizados en el apartado 3.6.3 y el recorrido diario de 90 km adoptado en el modelo, cada furgoneta L1H1 debe reponer 20,4 kWh diarios y cada vehículo de micro distribución 4,8 kWh. La energía que el microhub debe suministrar cada noche asciende, por tanto, a 1.030 kWh diarios, esto es, algo más de un megavatio-hora.

Conviene señalar que este valor es conservador. La hipótesis de kilometraje homogéneo atribuye 90 km diarios también a los vehículos de micro distribución, cuando en la operativa real de un microhub estos cubren el tramo capilar final y recorren distancias sensiblemente menores. La energía real que demandaría la instalación sería, en consecuencia, algo inferior a la calculada, lo que sitúa el dimensionado del lado de la seguridad.

En cuanto al número de puntos de recarga, el criterio de un punto por vehículo establecido en el apartado 6.5 conduce a 65 puntos de recarga, uno por cada vehículo de la flota capilar. Todos ellos son puntos de corriente alterna de 7,4 kW, ya que tanto las furgonetas L1H1 como los vehículos de micro distribución quedaron asignados a ese escalón en el apartado 6.4. Esta homogeneidad simplifica la instalación: el microhub no requiere recarga rápida en corriente continua, reservada en el modelo al camión eléctrico, que no forma parte de la flota capilar. La correspondencia entre puntos de recarga y plazas de estacionamiento, además, es directa, ya que cada plaza dimensionada en el apartado 7.3 incorpora su propio punto de carga.

Potencia de la instalación

La potencia se obtiene aplicando la metodología del apartado 6.3. La potencia instalada bruta, esto es, la suma de las potencias de los 65 puntos si todos operasen simultáneamente a plena carga, asciende a 481 kW. Este valor, sin embargo, no es el que la instalación necesita entregar, ya que las conexiones pueden escalonarse a lo largo de la ventana valle: con los cargadores asignados, una furgoneta L1H1 repone su energía diaria en algo más de tres horas y un vehículo de micro distribución en apenas cuarenta minutos, frente a las siete horas de ventana disponible.

El suelo físico de potencia, obtenido al repartir la energía diaria del microhub entre las siete horas de la franja valle, resulta:

$$P_{suelo} = \frac{1.030 \text{ kWh}}{7 \text{ h}} = 147,1 \text{ kW}$$

Una gestión de la recarga que escale las conexiones aproxima la potencia de diseño a este valor, muy por debajo de la potencia instalada bruta. Aplicando un margen de seguridad razonable sobre el suelo físico, para absorber las holguras de la operación real, la potencia a contratar se sitúa en el entorno de los 180-190 kW. La Tabla 18 resume el dimensionado.

Tabla 18: Infraestructura de recarga del microhub de referencia – Fuente: elaboración propia

Magnitud	Valor
Flota capilar	46 L1H1 + 19 micro distribución
Energía diaria a reponer	1.030 kWh/día
Puntos de recarga	65 (AC 7,4kW)
Potencia instalada bruta	481 kW
Suelo físico de potencia (7h)	147 kW
Potencia a contratar (con margen)	≈ 180-190 kW

Comprobación del orden de magnitud

Este resultado confirma la conclusión anticipada en el apartado 6.5. Una potencia del orden de 190 kW corresponde a una acometida de baja tensión ordinaria, comparable a la de un edificio terciario o a la de un pequeño establecimiento industrial, y perfectamente compatible con la capacidad de suministro de un aparcamiento subterráneo en un entorno urbano consolidado. La electrificación de la última milla, que a escala agregada exigía una potencia de decenas de megavatios, se descompone así, al distribuirse territorialmente entre los nodos de la red, en un conjunto de acometidas de tamaño convencional que no requieren infraestructura eléctrica singular en cada emplazamiento.

Esta descomposición constituye, de hecho, uno de los argumentos de mayor peso a favor del modelo de microhub desde el punto de vista eléctrico: la carga no se concentra en un único punto de la red, sino que se reparte entre numerosos emplazamientos distribuidos por la ciudad, cada uno con una demanda modesta y situada en horas valle. El reto para la red de distribución no es, en consecuencia, atender un gran consumidor puntual, sino integrar un elevado número de consumidores pequeños, un problema de naturaleza distinta y, en general, más manejable, si bien exige verificar la capacidad disponible en cada emplazamiento concreto.

Conviene señalar, por último, una coincidencia que refuerza la validez del dimensionamiento. El factor de simultaneidad que se deduce de los resultados obtenidos (el cociente entre el suelo físico de potencia, 147 kW, y la potencia instalada bruta, 481 kW) asciende a 0,31. Este valor no se ha impuesto como hipótesis, sino que emerge de la física de la operación: de la energía diaria que la flota debe reponer y de la amplitud de la ventana valle disponible para hacerlo.

Resulta significativo que ese resultado coincida prácticamente con el que la normativa española prescribe. Como se expuso en el apartado 6.3, la ITC-BT-52 establece un factor de simultaneidad de 0,3 para el dimensionamiento de instalaciones de recarga dotadas de un Sistema de Protección de la Línea (SPL), esto es, de gestión activa de la carga [46]. El modelo desarrollado en este trabajo, partiendo de datos operativos de la flota y sin recurrir a la norma, converge en el mismo valor. Esta coincidencia constituye una validación independiente del dimensionamiento: no solo la instalación proyectada es coherente con la reglamentación vigente, sino que el comportamiento real de una flota de última milla recargando en horas valle se ajusta de forma natural a los supuestos sobre los que el reglamento fue redactado.

7.5 ESQUEMA DE IMPLANTACIÓN Y ESCALADO A RED

Este último apartado sintetiza el dimensionado en un esquema de implantación que integra los resultados de los apartados anteriores, y cierra el capítulo evaluando qué supondría escalar el microhub de referencia a la red que requeriría el conjunto del centro urbano.

Esquema de implantación

La Figura 24 representa la implantación del microhub de referencia, organizada en los dos niveles que impone la restricción de gálibo expuesta en el apartado 7.1. El nivel de superficie aloja la zona de carga y descarga, situada en el viario adyacente al acceso del aparcamiento, en la que los diecisiete vehículos consolidados diarios (quince furgones L2H2 y dos camiones rígidos) depositan la mercancía sin llegar a acceder al interior de la instalación. Desde esta zona, la mercancía desciende al nivel subterráneo mediante la rampa o el montacargas del propio aparcamiento.

El nivel subterráneo, con una superficie aproximada de 1.250 m², se organiza en tres zonas funcionales. La zona de recepción y clasificación es donde se materializa la ruptura de carga: los 212,5 m³ diarios se desagregan y se asignan a las rutas capilares. Las zonas de estacionamiento y recarga alojan la flota capilar, con 46 plazas para furgonetas eléctricas L1H1 y 19 para vehículos de micro distribución, cada una dotada de su punto de recarga en corriente alterna de 7,4 kW. Por último, la acometida eléctrica, de aproximadamente 190 kW, alimenta el conjunto de los 65 puntos, operando en la ventana valle nocturna. La flota capilar abandona la instalación al inicio de la ventana de reparto matinal para efectuar la entrega en el interior de la Zona de Bajas Emisiones.

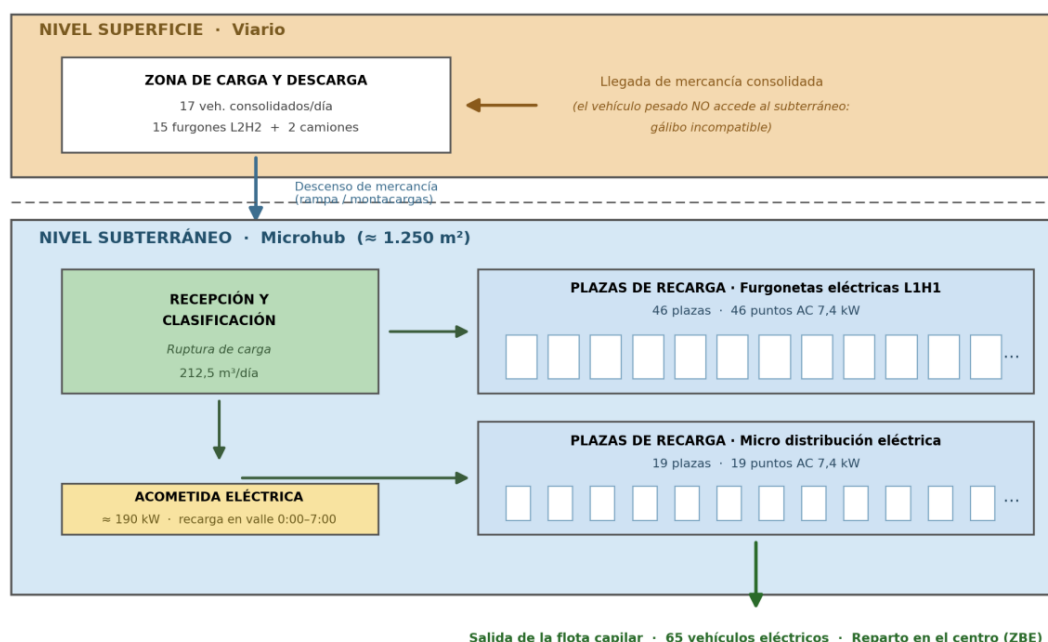


Figura 24: Esquema de implantación del microhub de referencia – Fuente: elaboración

Esta configuración resuelve las tres funciones que definen el microhub: la transferencia de la mercancía sin penetración de vehículos pesados en el centro, la ruptura de carga y la base de recarga de una flota capilar de cero emisiones.

Escalado a la red de microhubs

El microhub dimensionado constituye una unidad de diseño replicable. Determinar cuántas unidades serían necesarias para materializar íntegramente la medida simulada exige contrastar la capacidad de la instalación con el volumen total de mercancía que el escenario C somete a ruptura de carga.

En el horizonte 2050 de dicho escenario, los vehículos de gran capacidad que han sido descompuestos representan un volumen diario del orden de 43.400 m³, resultante de los furgones L2H2 y los camiones rígidos retirados del reparto en el centro. Contrastado con la cuota de 212,5 m³/día del microhub de referencia, este volumen exigiría una red de aproximadamente 204 microhubs.

Esta cifra debe interpretarse con la misma cautela que se aplicó a la potencia agregada del Capítulo 6. , pues comparte su naturaleza. El número de microhubs no es una estimación censal, sino el resultado de aplicar la cuota de servicio de la instalación al volumen desconsolidado de la flota representativa del modelo, y escala proporcionalmente con el tamaño de flota adoptado. Lo que el cálculo fija con independencia de ese tamaño no es el valor absoluto, sino la relación que lo genera: cada microhub del tipo dimensionado absorbe unos 212,5 m³ diarios, de modo que el número de instalaciones necesarias es el cociente entre el volumen total sometido a ruptura de carga y esa capacidad unitaria. Aplicada a la flota real de Madrid, una vez se conozca su tamaño, esta relación proporcionaría el número correspondiente.

Con esa salvedad, el orden de magnitud obtenido sí permite extraer una lectura cualitativa. La ruptura de carga exige un número de instalaciones elevado, no marginal, y ese requerimiento crece de forma proporcional al volumen que se pretenda desconsolidar. Ello sugiere que el microhub difícilmente puede concebirse como una solución generalizable a la totalidad de la distribución urbana del centro, y apunta más bien a una medida selectiva, aplicable a los ámbitos de mayor restricción de acceso y de mayor densidad de destinos, donde su beneficio ambiental compense la penalización por desconsolidación y el coste de la infraestructura. Determinar si la ciudad dispone de emplazamientos suficientes para acoger la red requerida exigiría un inventario de los aparcamientos subterráneos reconvertibles del centro, análisis que excede el alcance de este dimensionado y se apunta como línea de trabajo futura.

Esta lectura es coherente con lo que el propio escenario C anticipaba a escala de flota. Allí, la ruptura de carga reducía las emisiones del centro, pero multiplicaba el número de vehículos en circulación; aquí, esa misma multiplicación se traslada al número de instalaciones necesarias. Ambas apuntan en la misma dirección: el microhub es una herramienta eficaz de descarbonización local, pero su despliegue conlleva un coste en vehículos, en kilómetros y en infraestructura que crece con la escala, y que condiciona el alcance razonable de la medida.

Capítulo 8. ANÁLISIS ECONÓMICO

8.1 PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DE COSTES

Los capítulos anteriores han demostrado que la electrificación es la única estrategia capaz de reducir de forma sustancial las emisiones de la última milla, y han dimensionado la infraestructura que dicha transición requiere. Queda por responder la pregunta que, en la práctica, condiciona que esa transición llegue a producirse: si electrificar resulta económicamente rentable para el operador logístico y en cuánto tiempo se recupera la inversión. Este capítulo aborda esa cuestión mediante un análisis de Coste Total de Propiedad (TCO, Total Cost of Ownership), que compara el coste completo de un vehículo diésel con el de su equivalente eléctrico a lo largo de su vida útil.

El análisis se plantea a escala de vehículo individual, y no de flota. Se toma como vehículo de estudio el furgón L2H2, comparando su versión diésel con su versión 100 % eléctrica. Esta elección responde a que se trata del arquetipo dominante de la última milla madrileña: como se determinó en el apartado 3.3, los furgones diésel L2H2 concentran por sí solos en torno al 62 % del parque, de modo que su comportamiento económico condiciona en gran medida el del conjunto. Trabajar a escala de vehículo, además, evita que el resultado dependa del tamaño de flota adoptado en el modelo, que es un parámetro de escala y no un dato censal: el TCO por vehículo es una magnitud intrínseca, extrapolable a cualquier tamaño de flota mediante simple multiplicación.

El horizonte de análisis se fija en ocho años, periodo representativo de la vida útil de explotación de un vehículo comercial en una flota profesional y coherente con las edades de renovación consideradas en el modelo de simulación. Se adoptan, además, dos hipótesis que conviene declarar de antemano. La primera es que el cálculo se realiza sin ayudas públicas a la adquisición en el caso base; las subvenciones del Plan MOVES pueden reducir de forma apreciable el sobre coste inicial del vehículo eléctrico, pero su cuantía y su vigencia dependen de decisiones de política pública sujetas a cambio, por lo que excluirlas sitúa el análisis del lado conservador. La segunda es que se trabaja con costes corrientes, sin aplicar tasa de descuento financiero, una simplificación habitual en las estimaciones de TCO de flota que resulta suficiente para el propósito comparativo de este estudio.

Estructura de costes

El coste total de propiedad se descompone en dos bloques. El primero es el coste de adquisición (CAPEX), de carácter puntual, que comprende el precio de compra del vehículo y, en el caso del eléctrico, el coste del punto de recarga asociado, ya que la operación de un vehículo eléctrico en base exige disponer de la infraestructura dimensionada en el Capítulo 6. Este bloque es el que penaliza al vehículo eléctrico, cuyo precio de adquisición sigue siendo sensiblemente superior al de su equivalente de combustión.

El segundo bloque son los costes de operación (OPEX), de carácter recurrente, que se acumulan cada año de explotación. Comprenden fundamentalmente dos partidas. La primera es el coste energético: el gasóleo consumido por el vehículo diésel frente a la electricidad

consumida por el eléctrico, esta última recargada en la ventana valle nocturna definida en el apartado 3.5, lo que permite acogerse a los precios más bajos de la tarifa. La segunda es el mantenimiento, notablemente inferior en el vehículo eléctrico por la ausencia de motor de combustión, de cambio de aceite, de filtros y de sistema de escape, así como por el menor desgaste de frenos derivado de la frenada regenerativa. Este bloque es el que favorece al vehículo eléctrico y el que, acumulado a lo largo de los años, debe compensar el sobre coste inicial.

El punto de retorno de la inversión, o payback, es precisamente el año en el que el ahorro operativo acumulado del vehículo eléctrico iguala su sobre coste de adquisición. A partir de ese momento, la electrificación resulta rentable frente al diésel.

8.2 PARÁMETROS DE CÁLCULO

Los parámetros del análisis se recogen en la Tabla 19. Los datos técnicos (consumos y kilometraje) proceden de la caracterización de la flota y del modelo de simulación, mientras que los datos económicos se han tomado de fuentes de mercado actualizadas.

Tabla 19: Parámetros del análisis de coste total de propiedad (furgón L2H2) – Fuente: elaboración propia a partir de las referencias citadas

Parámetro	Furgón L2H2 diésel	Furgón L2H2 eléctrico	Fuente
Modelo de referencia	Mercedes Sprinter/Ford Transit	Ford E-Transit	Apartado 3.6.3
Consumo	10,0 L/100 km	30,8 kWh/100 km	Apartado 3.6.3
Kilometraje anual	22.500 km	22.500 km	Apartado 4.2
Precio de la energía	1,563 €/L	0,10 €/kWh (valle)	[47], [48]
Coste energético anual	3.517 €	693 €	Elaboración propia
Mantenimiento anual (estimado)	1.200 €	700 €	Estimación
OPEX anual total	4.717 €	1.393 €	Elaboración propia
Precio de adquisición	39.103 – 51.670 €	48.500 – 73.550 €	[49], [45]
Punto de recarga (instalado)	-	≈ 2.000 €	Estimación

Tres observaciones sobre estos parámetros. La primera, y más relevante, es la horquilla del precio de adquisición. Los precios de venta al público de catálogo sitúan el furgón eléctrico en el entorno de los 73.550 € frente a los 51.670 € del diésel equivalente, mientras que los precios efectivamente accesibles a una flota profesional, mediante campañas comerciales y descuentos por volumen, rebajan esas cifras hasta el orden de 48.500 € y 39.103 € respectivamente. Esta dispersión, lejos de ser un defecto del análisis, constituye uno de sus resultados, como se verá en el apartado siguiente.

La segunda observación se refiere al precio de la electricidad. Se adopta un valor de 0,10 €/kWh, representativo del término de energía en periodo valle para un suministro profesional. Este precio es consecuencia directa de la hipótesis de recarga nocturna establecida en el apartado 3.5: recargar en horas punta multiplicaría este coste por dos o por tres, erosionando buena parte de la ventaja operativa del vehículo eléctrico. La estrategia de recarga en valle no es, por tanto, un detalle operativo, sino una condición necesaria de la viabilidad económica.

La tercera se refiere al mantenimiento, para el que se adoptan valores estimados y no referenciados. La diferencia entre ambas tecnologías está ampliamente documentada en términos cualitativos, pero las cifras concretas varían mucho según el operador y el contrato de mantenimiento. Se han adoptado valores conservadores, con una diferencia de 500 €/año a favor del eléctrico, magnitud que resulta secundaria frente al ahorro energético y que, por tanto, no condiciona las conclusiones.

8.3 RESULTADOS: TCO COMPARADO Y PUNTO DE RETORNO

El ahorro operativo

El resultado más nítido del análisis se produce en el coste de operación. El furgón diésel consume 2.250 litros de gasóleo al año, que a los precios actuales suponen 3.488 €. El furgón eléctrico, recorriendo los mismos kilómetros, consume 6.930 kWh, que recargados en la ventana valle cuestan 693 €. El coste energético del vehículo eléctrico es, por tanto, cinco veces inferior al del diésel. Sumando la diferencia de mantenimiento, el ahorro operativo asciende a aproximadamente 3.300 € por vehículo y año.

Esta cifra es la magnitud clave del capítulo, y presenta una propiedad relevante: es robusta. No depende de negociaciones comerciales ni de campañas puntuales, sino de dos hechos estructurales, la mayor eficiencia del motor eléctrico y la diferencia de precio entre el gasóleo y la electricidad en horas valle. Es, en definitiva, la ventaja real y sostenida de la electrificación.

El punto de retorno

El sobrecoste de adquisición del vehículo eléctrico, incluido su punto de recarga, debe amortizarse con ese ahorro anual. Y es aquí donde el resultado depende críticamente del precio al que se adquieran los vehículos:

- Con precios de venta al público de catálogo, el sobrecoste inicial asciende a unos 23.900 €, que al ritmo de 3.324 €/año exigen aproximadamente siete años y dos meses para amortizarse.
- Con precios accesibles a una flota profesional, el sobrecoste se reduce a unos 11.400 €, que se amortizan en aproximadamente tres años y medio.

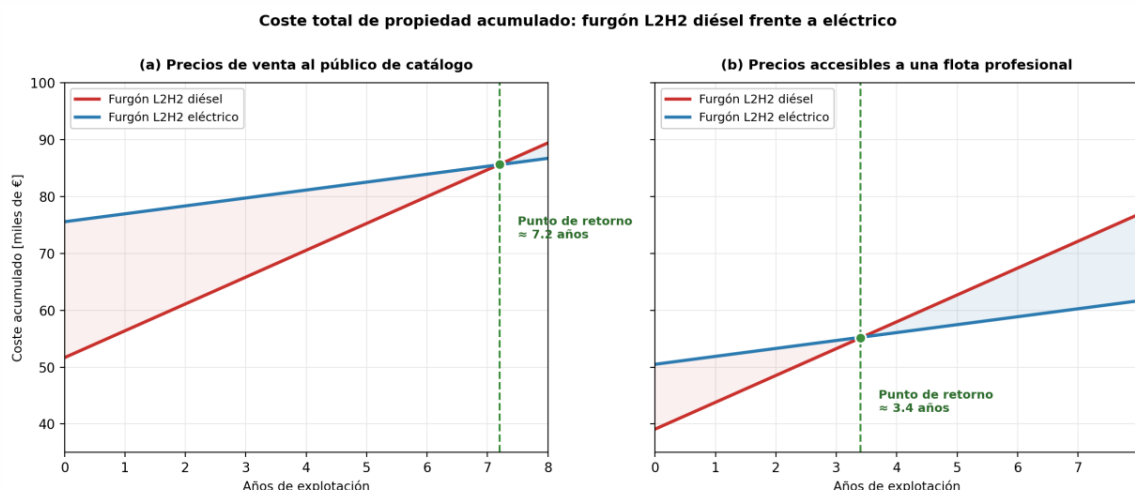


Figura 25: Coste total de propiedad acumulado del furgón L2H2, diésel frente a eléctrico, según el precio de adquisición – Fuente: elaboración propia

El punto de retorno se sitúa, por tanto, en una horquilla de entre tres y medio y algo más de siete años, dependiendo casi exclusivamente del precio de adquisición. La Figura 25 representa la evolución del coste acumulado en ambos escenarios.

Lectura

Este resultado, más que una indeterminación, constituye la principal conclusión económica del estudio: la viabilidad económica de la electrificación de la última milla no se juega en la operación, sino en la compra. El ahorro operativo es sólido y está fuera de discusión; lo que decide si la inversión se recupera o no es el precio al que el operador consiga adquirir el vehículo eléctrico. Una diferencia de precio de compra desplaza el punto de retorno en casi cuatro años, mientras que variaciones razonables en el coste de la energía o del mantenimiento apenas lo mueven.

Ambos escenarios amortizan dentro de la vida útil del vehículo, pero la diferencia entre ellos es cualitativa, no solo cuantitativa. A precio de flota, el vehículo eléctrico entra en beneficio a mitad de su tercer año y genera retorno durante más de la mitad de su vida útil: la electrificación es una decisión económicamente clara. A precio de catálogo, en cambio, el retorno llega apenas en el último año del horizonte, con un margen tan estrecho que cualquier desviación desfavorable (un kilometraje menor, una electricidad más cara, una vida útil más corta o una reventa anticipada) lo anularía. El operador que compra a precio de catálogo debe, además, soportar un sobrecoste de más de veinte mil euros durante siete años antes de ver un solo euro de retorno.

Esto explica la fractura del sector descrita en el apartado 3.1.2. Los grandes operadores, que adquieren flota por volumen y acceden a los mejores precios, se sitúan en el escenario favorable, y para ellos electrificar es una decisión racional, lo que coincide con su avance real. El transportista autónomo compra unidades sueltas a precio de catálogo, financia su propio punto de recarga y opera con márgenes reducidos: aunque la inversión llegue a recuperarse en el papel, el horizonte de siete años y la ausencia de margen la hacen inasumible en la práctica. La barrera económica identificada al caracterizar la flota queda así cuantificada: no es que el vehículo eléctrico no sea rentable, es que su rentabilidad llega demasiado tarde para quien no puede esperar.

De ello se deriva la palanca de política pública más eficaz: las ayudas a la adquisición, del tipo del Plan MOVES, actúan precisamente sobre el único término que decide el resultado. Una subvención que reduzca el sobrecoste inicial desplaza directamente el punto de retorno hacia el escenario favorable, sin necesidad de alterar ningún parámetro operativo. Dado que el caso base de este análisis se ha calculado deliberadamente sin ayudas, cualquier subvención efectiva mejora las cifras aquí presentadas, lo que refuerza el carácter conservador de las conclusiones.

Capítulo 9. CONCLUSIONES

9.1 CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

El presente trabajo se planteó evaluar la viabilidad técnica, económica y medioambiental de la descarbonización de la flota de última milla de la ciudad de Madrid. Ese propósito se articuló en siete objetivos específicos, cuyo grado de cumplimiento se recoge a continuación.

El primer objetivo, caracterizar el parque de última milla de partida, se ha alcanzado mediante la construcción de una flota de referencia de once tipos de vehículo, segmentada entre el reparto de paquetería (B2C) y la distribución comercial (B2B), y caracterizada por su composición tecnológica, su distribución de antigüedad y sus factores de consumo y emisión. El resultado dibuja un punto de partida inequívoco: los vehículos diésel representan el 86,6 % de la flota, dominada por el furgón de gran volumen L2H2, que concentra por sí solo en torno al 62 % del parque.

Los objetivos segundo, tercero y cuarto se han materializado en un modelo de simulación implementado en MATLAB, que representa el parque mediante una matriz de cohortes y reproduce su envejecimiento y renovación año a año en el horizonte 2026-2050, manteniendo la trazabilidad entre la antigüedad de cada vehículo, su norma de homologación y sus factores de emisión. Sobre esa dinámica se han simulado de forma independiente tres escenarios, correspondientes a las tres palancas de la transición: la velocidad de renovación, la tecnología de sustitución y la reorganización de la composición de la flota mediante microhubs; cuantificando para cada uno la evolución de las emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno y partículas, así como la demanda de energía eléctrica asociada a la electrificación, que el modelo evalúa en cada año como salida propia.

El quinto y el sexto objetivo abordan la materialización física de esa transición. El dimensionamiento de la infraestructura de recarga se ha desarrollado a partir de la demanda energética obtenida en la simulación y de la ventana de recarga nocturna, determinando la energía diaria a reponer por cada tipo de vehículo, el cargador que le corresponde, el número de puntos de recarga y la potencia agregada de la instalación. El diseño del microhub se ha concretado en la selección de un emplazamiento en el Distrito Centro, el dimensionado funcional de la instalación (volumen gestionado, flota capilar, superficie e infraestructura de recarga) y su esquema de implantación, junto con la cuantificación del coste que la ruptura de carga introduce en número de vehículos y kilómetros recorridos.

El séptimo objetivo, evaluar la viabilidad económica, se ha abordado mediante un análisis de coste total de propiedad del vehículo dominante de la flota, que determina el punto de retorno de la inversión y, sobre todo, identifica cuál es el factor que lo decide.

Los siete objetivos se consideran, por tanto, cumplidos. Las conclusiones que de ellos se derivan se exponen a continuación.

9.2 CONCLUSIONES TÉCNICAS

Del conjunto del trabajo se extraen seis conclusiones principales, ordenadas según la lógica que conduce de la tecnología a la viabilidad.

Primera: renovar la flota no descarboniza.

El escenario de renovación acelerada demuestra que sustituir vehículos antiguos por otros nuevos de la misma tecnología es una medida eficaz contra los contaminantes locales, pero completamente inútil frente al cambio climático. La renovación completa del parque diésel reduce las emisiones de NO_x en un 66 % y las de partículas en un 93 %, gracias a la severidad creciente de las normas Euro y, en el caso de las partículas, a la generalización del filtro. Sin embargo, las emisiones de CO₂ permanecen absolutamente invariables, en torno a las 58.000 t/año, con independencia de la velocidad a la que se renueve la flota. La razón es estructural: el CO₂ depende únicamente del combustible consumido, y un furgón diésel nuevo consume lo mismo que uno antiguo.

A ello se añade un segundo límite, menos evidente. Aun en los contaminantes que sí reduce, la renovación tropieza con un suelo infranqueable: por rápido que se renueve el parque, el NO_x no puede descender por debajo de los 30.500 kg/año que corresponden a una flota diésel íntegramente renovada a la norma más limpia disponible. Acelerar la renovación adelanta la llegada a ese suelo, pero no lo rebaja. La conclusión es que la renovación es una política de calidad del aire, no de descarbonización.

Segunda: la electrificación es la única palanca real, pero deja un residuo irreducible.

Solo el cambio tecnológico consigue atacar el CO₂ que la renovación no puede tocar. La electrificación total de la flota reduce las emisiones de dióxido de carbono desde las 58.000 hasta unas 10.000 t/año, un 83 % menos, y rompe además el suelo de NO_x del parque diésel, llevándolo hasta unos 4.500 kg/año, un 95 % por debajo del valor de partida.

Ese valor residual de 10.000 t/año encierra, sin embargo, una de las conclusiones más relevantes del estudio: la electrificación no elimina por completo las emisiones. El residuo corresponde a los vehículos frigoríficos, que la tecnología actual no permite electrificar sin comprometer la autonomía, dado el consumo continuo que exige el equipo de frío. La cadena de frío se revela como el eslabón más resistente de la descarbonización de la última milla, y como el ámbito donde el esfuerzo tecnológico resulta más necesario.

Tercera: el reto se desplaza del vehículo a la red, pero de forma más manejable de lo previsible.

La contrapartida de la electrificación es un incremento de la demanda de energía eléctrica que multiplica por diez el consumo de partida, hasta unos 70.000 MWh/año. Ese dato podría interpretarse como una amenaza para la red de distribución. El dimensionamiento realizado demuestra, sin embargo, que no lo es, y esta es una conclusión que contradice la intuición inicial.

La razón está en el propio perfil de la operación. Con un recorrido diario de 90 km, los vehículos consumen apenas entre un tercio y un 40 % de su batería, de modo que no necesitan

una recarga completa cada noche, sino solo reponer la energía del día. Y disponen, para hacerlo, de una ventana valle de siete horas. El resultado es que la recarga de la última milla es lenta: prácticamente toda la flota se repone con cargadores en corriente alterna de 7,4 y 11 kW, sin necesidad de recarga rápida en corriente continua, reservada únicamente al camión pesado como medida de respaldo.

De ello se derivan dos consecuencias favorables. La primera es que, al escalonar las conexiones a lo largo de la noche, la potencia de diseño se aproxima a un suelo físico determinado únicamente por la energía y el tiempo disponible, y al repartirse territorialmente entre los distintos depósitos y microhubs, la potencia por emplazamiento desciende a valores propios de una acometida ordinaria: el microhub de referencia dimensionado requiere apenas unos 190 kW. El dimensionamiento obtenido se ajusta, además, al factor de simultaneidad que la normativa española prescribe para instalaciones de recarga gestionada, lo que valida el enfoque adoptado. El reto para la red no es integrar un gran consumidor puntual, sino un número elevado de consumidores pequeños. La segunda consecuencia es que, al concentrarse en horas valle, la carga de la flota rellena el valle nocturno de la curva de demanda en lugar de agravar sus picos, aprovechando capacidad de generación y de red ociosa. La recarga gestionada convierte así un problema potencial en un uso favorable para el sistema eléctrico.

Cuarta: el microhub transforma el problema, no lo elimina.

La reorganización logística mediante microhubs consigue lo que promete: eliminar la penetración de vehículos pesados en el centro y sustituirlos por vehículos ligeros de cero emisiones. Pero lo hace a un precio que el modelo cuantifica con precisión. Cada vehículo consolidado se descompone en varias unidades menores, de modo que la flota que opera desde el microhub de referencia multiplica por casi cuatro el número de vehículos que sustituye: diecisiete vehículos pesados dan lugar a sesenta y cinco vehículos capilares. Esa fragmentación incrementa los kilómetros totales recorridos y la ocupación del viario, y exige además financiar y operar la propia instalación.

La proyección de esta relación al conjunto del volumen desconsolidado apunta a la necesidad de una red numerosa de instalaciones, cuyo requerimiento crece proporcionalmente al volumen que se pretenda desconsolidar. Ello sugiere que el microhub no puede concebirse como una solución generalizable a la totalidad de la distribución urbana, sino como una medida selectiva, aplicable a los ámbitos de mayor restricción de acceso y de mayor densidad de destinos, donde su beneficio ambiental compense la penalización que introduce.

Quinta: la viabilidad económica no se juega en la operación, sino en la compra.

El análisis de coste total de propiedad arroja una conclusión nítida. El ahorro operativo del vehículo eléctrico es sólido, cuantioso y estructural: su coste energético es cinco veces inferior al del diésel, lo que unido al menor mantenimiento supone un ahorro cercano a los 3.300 € anuales por vehículo. Ese ahorro no depende de negociaciones sino de la mayor eficiencia del motor eléctrico y del diferencial de precio entre el gasóleo y la electricidad en horas valle.

Lo que decide si la inversión se recupera es, en cambio, el precio de adquisición. El punto de retorno oscila entre tres años y medio y algo más de siete, según el precio al que el operador consiga comprar el vehículo. Una diferencia en el precio de compra desplaza el

retorno casi cuatro años, mientras que variaciones razonables en el coste de la energía o del mantenimiento apenas lo mueven. La palanca que decide la transición económica es, por tanto, la compra, no la operación.

Sexta: la barrera es estructural, no tecnológica.

Las cinco conclusiones anteriores convergen en una sola. La tecnología existe, funciona y es rentable en operación; lo que impide su adopción generalizada es la estructura del propio sector. La última milla madrileña presenta una dualidad marcada: los grandes operadores corporativos, que compran flota por volumen, acceden a los mejores precios y disponen de capacidad de financiación, se sitúan de hecho en el escenario económicamente favorable, y su avance real en electrificación así lo confirma. El transportista autónomo y la pequeña subcontrata, sobre los que recae buena parte de la ejecución física de las entregas, compran unidades sueltas a precio de catálogo, financian en solitario su punto de recarga y operan con márgenes reducidos: aunque la inversión llegue a recuperarse sobre el papel, el horizonte de siete años y la ausencia de margen la hacen inasumible en la práctica.

No es, por tanto, que el vehículo eléctrico no sea rentable. Es que su rentabilidad llega demasiado tarde para quien no puede esperar. Esta es la razón última por la que la descarbonización de la última milla avanza a dos velocidades, y la que determina dónde debe intervenir la política pública.

9.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Los resultados expuestos se han obtenido bajo un conjunto de hipótesis de diseño que, aunque justificadas en su momento, acotan el alcance de las conclusiones. Explicitarlas delimita con precisión qué afirma el trabajo y qué no, y constituye el punto de partida de las líneas de mejora que se apuntan más adelante.

El tamaño de la flota es un parámetro, no un censo

La limitación de mayor calado es la ausencia de un censo público que cuantifique el número real de vehículos de reparto de última milla que operan en Madrid, ya que los flujos de la distribución urbana se contabilizan a través de fuentes distintas y no consolidadas. Ante esa carencia, el modelo trabaja con una flota representativa de tamaño ajustable, sobre la que aplica las proporciones por tipo de vehículo obtenidas de la caracterización.

La consecuencia es que todas las magnitudes absolutas del estudio escalan con ese tamaño: las toneladas de CO₂, la demanda de energía, la potencia de la infraestructura de recarga, el número de microhubs y los costes totales. Ninguna debe interpretarse como una estimación censal de la ciudad, sino como el resultado de aplicar el modelo a un parque de referencia. Esta limitación, sin embargo, admite una lectura menos negativa de lo que parece, que se desarrolla en el apartado siguiente.

Hipótesis operativas simplificadoras

El modelo adopta un kilometraje homogéneo de 90 km diarios para toda la flota, cuando en la realidad el recorrido varía sensiblemente entre tipologías. El caso más forzado es el del vehículo de micro distribución, concebido para el tramo final desde un microhub, al que la hipótesis atribuye un recorrido muy superior al real. Del mismo modo, se adopta una ventana horaria única de reparto (7:00-13:00 h) extrapolada del canal HORECA, cuando la paquetería a particulares presenta un perfil más vespertino. Ambas simplificaciones resultan conservadoras para el dimensionamiento, pues sobrestiman el consumo y la energía a reponer, pero difuminan las diferencias reales entre tipologías y limitan el análisis de la congestión por franjas horarias.

Finalmente, el dimensionado del microhub asume una única rotación diaria de la flota capilar, cuando un vehículo de micro distribución podría completar varias vueltas desde el hub dentro de la ventana matinal. La hipótesis se mantiene por coherencia con el escenario simulado y sitúa el dimensionado del lado de la seguridad, pero sobrestima previsiblemente los requerimientos de la instalación.

El alcance del cálculo de emisiones

El estudio adopta un alcance Tank-to-Wheel: contabiliza únicamente las emisiones que el vehículo genera durante su circulación, y no las asociadas a la producción del combustible o de la electricidad. Es el criterio con el que las zonas de bajas emisiones clasifican a los vehículos, por lo que resulta coherente con el marco normativo y adecuado para evaluar el impacto sobre la calidad del aire urbano, que es donde se produce el daño a la salud.

No captura, sin embargo, la huella de carbono completa de la electrificación: quedan fuera del cálculo tanto las emisiones asociadas a la generación de la electricidad consumida, que dependen del mix eléctrico nacional, como las emisiones incorporadas en la fabricación de los vehículos y, muy singularmente, de sus baterías. La reducción del 83 % en CO₂ del escenario de electrificación total debe entenderse, por tanto, como una reducción de emisiones directas, y no de la huella global.

Limitaciones del modelo de simulación

El escenario de microhubs aplica la descomposición a la fracción de vehículos que se jubilan cada año, de modo que el proceso es acumulativo y no ha alcanzado un estado estacionario en 2050: si el horizonte se prolongase, la flota continuaría creciendo. El resultado corresponde, por tanto, a la fotografía del año 2050, horizonte de neutralidad climática adoptado, y no a un equilibrio de largo plazo. Asimismo, el modelo mantiene constante el tamaño de la flota, asumiendo que cada vehículo jubilado da lugar a uno nuevo, por lo que no incorpora el crecimiento previsible de la demanda de reparto asociado a la expansión del comercio electrónico.

Limitaciones del análisis económico

El análisis de coste total de propiedad se ha planteado como estimación y no como modelo financiero detallado. Se realiza a escala de vehículo individual, tomando el furgón L2H2 como arquetipo representativo por ser el dominante de la flota; se trabaja con costes corrientes, sin tasa de descuento, lo que resulta suficiente para el propósito comparativo, pero no equivale a un análisis de valor actual neto; y se excluyen del caso base las ayudas públicas a la adquisición, cuya inclusión mejoraría los resultados, por lo que las conclusiones económicas son conservadoras. Los precios de adquisición, además, proceden de fuentes comerciales y presentan una dispersión considerable, circunstancia que el propio análisis convierte en resultado al presentar el punto de retorno como una horquilla en lugar de como un valor único.

9.4 ESCALABILIDAD Y REPLICABILIDAD

La primera de las limitaciones señaladas (que el modelo no trabaja con el censo real de la flota de Madrid, sino con un parque representativo) merece un tratamiento propio, pues su lectura no es únicamente la de una carencia. De ella se deriva, en realidad, una de las propiedades más valiosas del trabajo: su escalabilidad. Conviene precisar, por tanto, en qué medida los resultados dependen del tamaño de flota adoptado y, más allá, en qué medida el estudio puede trasladarse a otras flotas y a otras ciudades.

Escalabilidad: la flota como parámetro

El modelo desarrollado no trabaja con el censo real de vehículos de reparto de Madrid, que no existe públicamente, sino con una flota representativa de tamaño ajustable sobre la que se aplican las proporciones por tipo de vehículo obtenidas de la caracterización. Esta elección, lejos de ser únicamente una limitación, es una propiedad deliberada del modelo, y conviene entender exactamente qué implica.

Los resultados del estudio se dividen en dos categorías. Los resultados relativos: los porcentajes de reducción de cada contaminante, la comparación entre escenarios, la forma de las curvas de evolución, el punto de retorno del TCO o el multiplicador de vehículos del microhub. Todos ellos son independientes del tamaño de la flota. Si el parque fuese el doble de grande, todas las emisiones se duplicarían, pero la reducción del 83 % en CO₂ seguiría siendo del 83 %, el punto de retorno seguiría situándose entre tres años y medio y algo más de siete, y el microhub seguiría multiplicando por 3,8 los vehículos que sustituye. Estas son las conclusiones robustas del trabajo, y no dependen de ninguna hipótesis sobre el tamaño real del parque.

Los resultados absolutos: las toneladas de CO₂, los megavatios-hora de demanda, los megavatios de potencia agregada, el número de microhubs de la red sí escalan proporcionalmente con el tamaño de flota adoptado, y deben leerse como magnitudes ilustrativas y no como estimaciones censales. Pero lo relevante es que el modelo no entrega solo cifras, sino las reglas que las generan, y esas reglas sí son universales: la potencia agregada de la infraestructura es la energía anual dividida entre los días operativos y las horas de la ventana de recarga; el número de microhubs es el volumen desconsolidado dividido entre la capacidad unitaria de la instalación. Introduciendo en ellas el tamaño real del parque, el día en que se conozca, se obtienen directamente los valores correspondientes, sin necesidad de rehacer el modelo.

El tamaño de la flota actúa, en definitiva, como un simple factor de escala, implementado como parámetro ajustable. Ello permite aplicar el estudio tanto a la flota completa de la ciudad como a la de un único operador que quiera evaluar su propia transición, sin alterar en absoluto la estructura del análisis.

Replicabilidad: el modelo más allá de Madrid

La misma propiedad que hace el modelo escalable lo hace replicable. Su arquitectura, una matriz de cohortes que envejece, jubila y renueva la flota año a año, sobre la que se aplican factores de emisión dependientes de la norma Euro, no contiene nada específico de Madrid. Lo que sí es propio de Madrid es el conjunto de datos de entrada: la composición de la flota

por tipo de vehículo, su distribución de antigüedad, la ventana horaria de reparto, el kilometraje diario y la velocidad media de circulación.

Trasladar el estudio a otra ciudad no exige, por tanto, reconstruir el modelo, sino sustituir sus parámetros de entrada. Una ciudad con una estructura logística distinta (con mayor peso del canal HORECA, con un centro histórico más restrictivo o con una flota más envejecida) obtendría resultados diferentes, pero mediante el mismo procedimiento. La metodología es la aportación transferible; los números son el resultado de aplicarla a un caso concreto.

No obstante, conviene señalar qué elementos son más y menos transferibles. Los factores de emisión proceden del inventario EMEP/EEA y son válidos para toda Europa, sin necesidad de ajuste. La estructura de la flota exige recaracterización, pues depende del tejido logístico de cada ciudad. La ventana de recarga y los precios de la energía dependen del sistema eléctrico y del mercado nacional, por lo que son directamente aplicables a cualquier ciudad española y requieren ajuste fuera de ella. Y el microhub es el elemento menos transferible de todos: su dimensionado se apoya en la red de aparcamientos subterráneos del centro de Madrid, una infraestructura singular que no todas las ciudades poseen y que, allí donde no exista, obligaría a replantear la tipología del emplazamiento.

En síntesis, el trabajo entrega una metodología replicable y unos resultados relativos robustos, particularizados a Madrid mediante un conjunto de datos de entrada que otra ciudad debería sustituir por los suyos propios.

9.5 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Las limitaciones expuestas no son callejones sin salida, sino direcciones de desarrollo. De ellas, y del propio alcance del trabajo, se derivan seis líneas de continuación que permitirían profundizar en el análisis y elevar su valor como herramienta de decisión.

Determinación del tamaño real de la flota de última milla de Madrid

Es la línea de mayor impacto, pues convertiría todas las magnitudes absolutas del estudio en estimaciones censales. El modelo ya proporciona las reglas de conversión; lo que falta es el dato de entrada. Su obtención exigiría un trabajo de campo o un acuerdo de acceso a datos con los operadores logísticos y con el Ayuntamiento, cruzando los registros del sector postal, los del transporte de mercancías y los permisos de carga y descarga de la ciudad. Con ese único dato, las cifras de emisiones, demanda energética, potencia de la infraestructura y número de microhubs pasarían de ser ilustrativas a ser una fotografía real de la ciudad.

Inventario de emplazamientos aptos para microhubs

El presente trabajo dimensiona un microhub de referencia y establece la capacidad unitaria que puede absorber, pero no verifica cuántos emplazamientos reales existen en el centro de Madrid con las condiciones necesarias: superficie disponible, gálibo compatible, acometida eléctrica suficiente y espacio en el viario adyacente para la zona de carga y descarga. Un inventario de los aparcamientos subterráneos reconvertibles del distrito permitiría contrastar la red de microhubs que la desconsolidación requiere con la que la ciudad puede realmente acoger, y determinar así el alcance máximo aplicable de la medida. Esta línea es, de hecho, la que permitiría cerrar de forma concluyente el debate sobre la escalabilidad del modelo de ruptura de carga.

Ampliación del alcance ambiental: análisis Well-to-Wheel

La adopción de un alcance Tank-to-Wheel resulta adecuada para evaluar la calidad del aire urbano, pero no captura la huella de carbono completa de la electrificación. Extender el análisis a un enfoque Well-to-Wheel, incorporando las emisiones asociadas a la generación de la electricidad según el mix eléctrico español y su evolución prevista, permitiría cuantificar el beneficio climático real de la transición. Un desarrollo adicional, más ambicioso, consistiría en incorporar el análisis de ciclo de vida completo, incluyendo las emisiones de fabricación de los vehículos y, en particular, de sus baterías, cuya huella constituye hoy una de las principales objeciones al vehículo eléctrico.

Integración con la red eléctrica y gestión activa de la demanda

El dimensionamiento de la infraestructura de recarga se ha planteado bajo la hipótesis de una recarga nocturna gestionada, pero deja fuera dos desarrollos de interés. El primero es la cuantificación del impacto sobre la curva de demanda del sistema eléctrico, que requeriría conocer el tamaño real de la flota y contrastarlo con las curvas del operador del sistema, y que permitiría evaluar en qué medida la recarga de la última milla contribuye efectivamente a aplanar el valle nocturno. El segundo es la incorporación de tecnologías de recarga bidireccional (V2G) y de almacenamiento estacionario, que permitirían a la flota no solo

consumir energía, sino también aportar flexibilidad al sistema, devolviendo energía a la red en los momentos de mayor demanda y abriendo con ello una vía adicional de rentabilidad para el operador.

Optimización de la localización de microhubs y de las rutas

El modelo desarrollado dimensiona un microhub, pero no optimiza su ubicación. Una línea natural de continuación sería formular el problema como uno de localización óptima, determinando, para un número dado de instalaciones, dónde situarlas para minimizar la distancia total recorrida por la flota capilar, y resolverlo mediante técnicas de optimización matemática. En esa misma dirección, la incorporación de un modelo de enrutamiento permitiría afinar la penalización por desconsolidación, que en el presente trabajo se ha estimado conservadoramente asumiendo una única rotación diaria y un kilometraje homogéneo, y que un modelo de rutas reales situaría con mayor precisión.

Extensión del análisis económico

Finalmente, el análisis de coste total de propiedad admite tres desarrollos inmediatos: su extensión al resto de tipologías de vehículo de la flota, más allá del furgón L2H2; la incorporación de una tasa de descuento financiero, que permitiría expresar los resultados en términos de valor actual neto; y un análisis de sensibilidad sistemático frente a los parámetros más inciertos, en particular el precio de la energía y la cuantía de las ayudas públicas a la adquisición.

9.6 RECOMENDACIÓN FINAL

El presente trabajo se planteó, en su motivación inicial, como una herramienta de soporte a la toma de decisiones. Las conclusiones expuestas permiten formular un conjunto de recomendaciones dirigidas a los dos actores que deben adoptarlas: la administración municipal, y en particular el Ayuntamiento de Madrid como responsable de la estrategia Madrid 360, y los propios operadores logísticos.

Recomendaciones a la administración municipal

La primera se deriva de la conclusión económica del estudio: la palanca pública más eficaz es la ayuda a la adquisición. El vehículo eléctrico ya es competitivo en operación, con un ahorro estructural cercano a los 3.300 € anuales, y lo que impide su adopción no es su coste de uso, sino su precio de compra. Toda intervención que reduzca el sobrecoste inicial actúa sobre el único término que decide el resultado, mientras que abaratar la operación tendría un efecto marginal. Los programas de ayuda a la compra, del tipo del Plan MOVES, son por tanto el instrumento correcto, y su eficacia se multiplicaría si se orientasen de forma preferente al segmento que más los necesita.

Ese segmento está identificado con precisión: el transportista autónomo y la pequeña subcontrata. La transición avanza a dos velocidades, no por diferencias de concienciación ni de tecnología, sino por una asimetría estructural en la capacidad de compra. El gran operador, que adquiere por volumen, ya se encuentra en el escenario favorable y electrifica por decisión racional propia; el autónomo, que compra unidades sueltas a precio de catálogo y financia en solitario su punto de recarga, afronta un horizonte de retorno de siete años que su margen no le permite soportar. Una política de ayudas indiferenciada beneficiaría sobre todo a quien ya iba a electrificar; una política focalizada atacaría el cuello de botella real de la transición, y no se trata de un segmento marginal: sobre él recae buena parte de la ejecución física del reparto en la ciudad.

La segunda recomendación se refiere a la infraestructura de recarga, y permite desmontar un temor extendido: la electrificación de la última milla no exige infraestructura singular ni una transformación profunda de la red. Se trata de una recarga lenta, nocturna y predecible, que se resuelve con cargadores en corriente alterna de potencia moderada y que, al repartirse territorialmente, se traduce en acometidas de tamaño ordinario. Se recomienda, en consecuencia, priorizar la recarga en base o depósito frente a la recarga rápida en vía pública, facilitando administrativamente la instalación de puntos de carga en las bases logísticas y en los aparcamientos, que es donde la flota realmente pernocta: una infraestructura más barata, menos exigente para la red y mejor alineada con la operación real del sector.

La tercera afecta al modelo de microhub. El trabajo confirma su eficacia para eliminar la penetración de vehículos pesados en el centro, pero también cuantifica su coste: multiplica por casi cuatro el número de vehículos que sustituye y exige una red numerosa de instalaciones. Se recomienda por ello concebirlo como una medida selectiva y no generalizable, priorizando su implantación en el casco histórico y en las zonas de mayor restricción de acceso y densidad de destinos, donde su beneficio compensa claramente la penalización que introduce. La red de aparcamientos subterráneos municipales constituye

para ello un activo singular, cuya reconversión debe planificarse con criterios de capacidad y no de mera disponibilidad.

Por último, se recomienda abordar la carencia de información que este mismo trabajo ha tenido que sortear. La inexistencia de un censo público de la flota de última milla obliga a cualquier estudio riguroso a trabajar con parques representativos y limita la capacidad de la administración para dimensionar sus políticas. Generar esa estadística, cruzando los registros disponibles y los permisos de carga y descarga, es una medida de coste reducido y alto valor, sin la cual toda planificación de la distribución urbana opera parcialmente a ciegas.

Recomendaciones al operador logístico

Para el operador la conclusión es más directa: electrificar es rentable, y el ahorro operativo lo justifica por sí solo. La decisión relevante no es si electrificar, sino cómo hacerlo para acortar el punto de retorno, y el estudio señala tres condiciones determinantes. La primera es la negociación del precio de compra, el factor que más desplaza el retorno: adquirir a precio de flota en lugar de a precio de catálogo supone casi cuatro años de diferencia, y la agrupación de la demanda mediante compras conjuntas o asociaciones sectoriales es la vía natural para que el pequeño operador acceda a condiciones que hoy solo obtiene el grande. La segunda es la recarga nocturna en horas valle, que no es un detalle operativo sino una condición de la rentabilidad, pues recargar en punta erosionaría buena parte de la ventaja del vehículo eléctrico. La tercera es la gestión escalonada de la recarga, que reduce sustancialmente la potencia contratada y el coste de la infraestructura, aprovechando que la flota dispone de una ventana nocturna mucho más amplia que el tiempo que necesita para cargar.

Conclusión final

La descarbonización de la última milla de Madrid no es, a la luz de este estudio, un problema tecnológico: la tecnología existe, funciona y es rentable en operación. Tampoco es un problema de conocimiento, pues los modelos logísticos alternativos están ensayados y documentados. Es, ante todo, un problema de estructura económica y de acompañamiento público: de que quien debe realizar la inversión pueda permitírsela, y de que la ciudad disponga de la información y la infraestructura necesarias para acompañarla.

El trabajo aquí desarrollado ofrece las cifras que permiten dimensionar ese acompañamiento. Muestra qué consigue cada estrategia y dónde están sus límites: que renovar la flota mejora el aire, pero no el clima; que solo la electrificación reduce el CO₂, aunque deje un residuo en la cadena de frío; que la infraestructura necesaria es más asequible de lo que se teme; que el microhub resuelve el centro a costa de multiplicar los vehículos; y que la viabilidad económica, en última instancia, se juega en la compra y no en la operación. Con esas cifras, la decisión deja de ser un acto de fe para convertirse en lo que debe ser: un problema de ingeniería con solución cuantificada.

Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Environment Agency, «Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport», jun. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/transport-and-environment-report-2021>
- [2] The Scientific World Journal (Lebeau, P.; Macharis, C.; Van Mierlo, J.; Lebeau, K.), «Conventional, Hybrid, or Electric Vehicles: Which Technology for an Urban Distribution Centre?», jul. 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4509519/>
- [3] Ayuntamiento de Madrid, Movilidad y Transportes, «Carga y Descarga Inteligente. Normativa e Información General». [En línea]. Disponible en: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Movilidad-y-transportes/Carga-y-Descarga-Inteligente-Normativa-e-Informacion-General/?vgnnextfmt=default&vgnextoid=f8882cf1178f2810VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnnextchannel=220e31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD>
- [4] European Environment Agency, «Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport», jun. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/transport-and-environment-report-2021>
- [5] Fabris, F.; Artuso, P.; Marinetti, S.; Minetto, S.; Rossetti, A. (Applied Thermal Engineering, vol. 216, 119132), «Cooling unit impact on energy and emissions of a refrigerated light truck», nov. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119132>
- [6] Transport for London, «Freight and servicing action plan». Mayor of London, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://content.tfl.gov.uk/freight-servicing-action-plan.pdf>
- [7] Rhenus Group, «Rhenus Home Delivery's electric fleet has grown to 300 vehicles», sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rhenus.group/cn/en/news-media/detail/rhenus-home-deliverys-electric-fleet-has-now-grown-to-300-vehicles-co2-free-deliveries-for-ikea-in-berlin-from-september-2024-onwards/>
- [8] EMT Madrid, «Un “microhub” logístico en el parking de Plaza Mayor para impulsar el reparto de bajas emisiones», oct. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/Noticias/Un-microhub%E2%80%9D-logistico-en-el-parking-de-Plaza-May.aspx>
- [9] City of Gothenburg, «Stadsleveransen: A success story», CIVITAS/ Urban Transport Administration, sep. 2016. [En línea]. Disponible en: https://civitas.eu/sites/default/files/session_2_-_1._stadsleveransen_a_success_story_-_m._coldrey.pdf
- [10] Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relación con las Cortes, «Real Decreto-ley 29/2021, de 21 de diciembre, por el que se adoptan medidas urgentes en el ámbito energético para el fomento de la movilidad eléctrica, el autoconsumo y el despliegue de energías renovables.» [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rdl/2021/12/21/29/con>
- [11] José María Maza Ortega, ANTONIO GÓMEZ EXPÓSITO, y Universidad de Sevilla, «Sistema de recarga de vehículos eléctricos: Revisión tecnológica e impacto en el Sistema Eléctrico». [En línea]. Disponible en:

- <https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/411/MAZA%20Y%20G%C3%93MEZ.pdf>
- [12] OKGREEN, «La logística y el transporte rechazan la obligación de comprar eléctricos», feb. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://okdiario.com/okgreen/sector-logistica-del-transporte-rechaza-que-les-obligue-comprar-vehiculos-electricos-14305338>
- [13] Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), «La antigüedad del parque de turismos en España sigue al alza y alcanza los 14,2 años de media», feb. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://anfac.com/wp-content/uploads/2024/02/20240229-NP-ANFAC-Envejecimiento-del-parque-2023.pdf>
- [14] European Environment Agency (EEA), «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 — 1.A.3.b.i-iv Road transport (exhaust emissions)», 2023. [En línea]. Disponible en: <https://copert.emisia.com/wp-content/uploads/2024/07/1.A.3.b.i-iv-Road-transport-2024.pdf>
- [15] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), «Panel de Hogares: Sector Postal y Comercio Electrónico», jun. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.cnmc.es/2025/06/13/panel-de-hogares-cnmc-quien-te-trae-los-paquetes-a-casa/>
- [16] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), «Informe Anual del Sector Postal», Madrid, España, jul. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnmc.es/sites/default/files/6089770.pdf>
- [17] Amazon España, «Colaboradores de reparto de Amazon». [En línea]. Disponible en: <https://www.aboutamazon.es/nuestro-impacto/empoderamiento/colaboradores-de-reparto>
- [18] Sala de Prensa Correos, «Correos incorpora más de 1.000 vehículos eléctricos a su flota de reparto», jul. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.correos.com/sala-prensa/correos-incorpora-mas-de-1-000-vehiculos-electricos-a-su-flota-de-reparto/>
- [19] Fleet People, «SEUR alcanza 670 vehículos electrificados y eleva al 16% sus kilómetros de bajas emisiones», sep. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fleetpeople.es/seur-alcanza-670-vehiculos-electrificados-y-eleva-al-16-sus-kilometros-de-bajas-emisiones/>
- [20] DHL Express España, «DHL Express España refuerza su última milla sostenible de la mano de Ford Pro y añade 46 E-Transit a su flota», abr. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dhl.com/es-es/home/prensa/archivo-de-prensa/2024/dhl-express-espana-refuerza-su-ultima-milla-sostenible-de-la-mano-de-ford.html>
- [21] SEUR, «SEUR adquiere una flota de 200 Ford E-Transit, la versión 100% eléctrica del furgón de carga más vendido del mundo», nov. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://saladeprensa.seur.com/2022/11/23/seur-la-empresa-lider-en-espana-en-transporte-urgente-adquiere-una-flota-de-200-ford-e-transit-la-version-100-electrica-del-furgon-de-carga-mas-vendido-del-mundo/>
- [22] Amazon España, «Amazon amplía su flota de transporte en España con 300 furgonetas eléctricas de Stellantis», oct. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.todotransporte.com/texto-diario/mostrar/5476084/amazon-amplia-flota-transporte-espana-300-furgonetas-electricas-stellantis>
- [23] Observatorio de la Movilidad Metropolitana, «Monografía III: Distribución Urbana de Mercancías», dic. 2023. [En línea]. Disponible en: https://observatoriomovilidad.es/wp-content/uploads/2026/03/Monografia_III_OMM_2023_Distribucion_Urbana_de_Mercancias.pdf

-
- [24] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, «Análisis sobre los hábitos de aprovisionamiento en las actividades de restauración», 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/alimentacion/temas/consumo-y-tendencias-en-alimentacion/panel-de-consumo-alimentario/hosteleria-y-restauracion/estudio-habitos-de-aprovisionamiento-2013.pdf>
- [25] Mahou San Miguel, «Mahou San Miguel lanza Voldis Express, un servicio de entrega a la Hostelería en menos de tres horas 100% sostenible», feb. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.mahou-sanmiguel.com/es-es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/mahou-san-miguel-lanza-voldis-express-un-servicio-de-entrega-a-la-hosteleria-en-menos-de-tres-horas?srsId=AfmBOopoC8fxo6JWtUeU1LnaZgy1sIWVDDa2z2Fgse26crK60aFlUI>
- [26] Logística Profesional, «Heineken lleva a cabo en Sevilla el primer sistema de reparto sostenible de última milla ‘de la fábrica al bar’», sep. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.logisticaprofesional.com/texto-diario/mostrar/3903772/heineken-lleva-cabo-sevilla-primer-sistema-reparto-sostenible-ultima-milla-fabrica-bar>
- [27] CdeComunicación, «Coca-Cola empezará a operar con camiones eléctricos de largo recorrido», may 2023. [En línea]. Disponible en: <https://logistica.cdecomunicacion.es/sector-logistico/131330/coca-cola-camiones-largo-recorrido-electricos>
- [28] Auto Revista, «La media de edad de vehículos de renting se sitúa en los dos años», mar. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.auto-revista.com/texto-diario/mostrar/5814558/media-edad-vehiculos-renting-situa-anos>
- [29] Autónomos en Ruta, «Furgoneta Mercedes Benz Sprinter Tech 316 7Gtronic... valor seguro!», sep. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.autonomosenruta.com/pruebas/vehiculos-ligeros/furgoneta-mercedes-benz-sprinter-prueba>
- [30] Spritmonitor.de, «Mercedes-Benz Sprinter 315 CDI — consumo real de usuarios». [En línea]. Disponible en: <https://www.spritmonitor.de/es/detalle/495086.html?cdetail=1>
- [31] Moeve, «¿Cuánto consume un camión y cómo puedes gastar menos?», sep. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.moeve.es/es/blog/cuanto-consume-camion>
- [32] Toptruck, «¿Sabes cuánto diésel consume un camión por kilómetro? Factores del gasto en combustible», may 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.toptruck.es/noticia/sabes-cuanto-diesel-consume-un-camion-por-kilometro-factores-del-gasto-en-combustible>
- [33] Box Repsol (Repsol), «¿Cuáles son los mejores scooter de 125 en 2026?», may 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boxrepsol.com/es/vive-tu-moto/cuales-son-las-mejores-scooter-de-125/>
- [34] Motos Coches.net, «Prueba de consumo: ¿Qué es más eficiente una moto 125 o una 750?», may 2023. [En línea]. Disponible en: <https://motos coches.net/noticias/prueba-de-consumo-honda-forza-125-honda-x-adv-2023>
- [35] Renault España, «Kangoo Furgón — Datos técnicos». [En línea]. Disponible en: <https://empresas.renault.es/comerciales/kangoo-furgon/datos-tecnicos.html>
- [36] Motofichas, «Honda PCX125 — ficha técnica», mar. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.motofichas.com/marcas/honda/pcx125>
-

- [37] Mercedes-Benz España, «Sprinter Furgón — dimensiones y equipamiento». [En línea]. Disponible en: <https://www.mercedes-benz.es/vans/models/sprinter/panel-van/overview.html>
- [38] Gesnol, «Tipos de camión». [En línea]. Disponible en: https://gesnol.com/wp-content/uploads/TIPOS_CAMION.pdf
- [39] MotoEmoción, «Moto eléctrica de reparto Silence S02». [En línea]. Disponible en: <https://motoemocion.com/tienda/motos-electricas/motos-electricas-de-reparto/moto-electrica-silence-s02/>
- [40] Citroën España, «Citroën ë-Berlingo Van Eléctrico». [En línea]. Disponible en: <https://profesionales.citroen.es/vehiculos-citroen/berlingo-van/electrico.html>
- [41] MotorK, «Citroen ë-Berlingo Talla M Eléctrico Shine». [En línea]. Disponible en: <https://motork.com/citroen-e-berlingo-talla-m-electrico-50-kwh-shine-oferta>
- [42] EV-Renting, «Ford Transit EV». [En línea]. Disponible en: <https://ev-renting.com/es/vehiculos/ford-transit>
- [43] Scoobic, Urban Movility, «Scoobic “The Last Mile Solution”». [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/scoobic/docs/catalogo_bio_sept23_en?fr=xKAE9_zU1NQ
- [44] Transporte 3, «Un año con un Renault Trucks E-Tech D 16: “Una alternativa de transporte más limpia y eficiente”», mar. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://transporte3.com/noticia/21827-grupo-cuevas-renault-trucks-e-tech-d-16-reduccion-del-impacto-ambiental-sin-comprometer-la-calidad-del-servicio-ni-la-competitividad-del-negocio/>
- [45] Carwow, «Precio y opinión del Ford E-Transit Furgón». [En línea]. Disponible en: <https://www.carwow.es/ford/e-transit-furgon>
- [46] Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relación con las Cortes, «Real Decreto 1053/2014, de 12 de diciembre, por el que se aprueba una nueva Instrucción Técnica Complementaria (ITC) BT 52». [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2014-13681>
- [47] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Miteco), «Precios de carburantes y combustibles», jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/petroleo/Informes/InformesMensuales/DatosBibliotecaConsumer/2026/Junio%202026.pdf>
- [48] Red Eléctrica, «Término de facturación de energía activa del PVPC». [En línea]. Disponible en: <https://www.esios.ree.es/es/pvpc?date=13-01-2026>
- [49] Carwow, «Precio y opinión del Ford Transit Furgón». [En línea]. Disponible en: <https://www.carwow.es/ford/transit-furgon>

ANEXO A. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

A.1 INTRODUCCIÓN

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que articulan la acción global en materia de sostenibilidad. La descarbonización de la logística de última milla, objeto de este trabajo, se sitúa en la intersección de varios de ellos, pues afecta simultáneamente al clima, a la calidad del aire urbano, a la salud de la población y a la infraestructura de las ciudades.

El apartado 1.5 de la memoria enunció los cuatro objetivos con los que el proyecto guarda relación principal. Este anexo desarrolla esa alineación, contrastándola con los resultados efectivamente obtenidos y reconociendo tanto el alcance real de la contribución como sus límites y las tensiones que el propio estudio ha puesto de manifiesto entre unos objetivos y otros.

A.2 ODS 11. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

Este objetivo constituye el eje central del trabajo. La meta 11.6 persigue reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y a la gestión de los residuos. La distribución urbana de mercancías es precisamente uno de los focos de ese impacto: pese a representar una fracción reducida del tráfico, concentra una parte muy superior de las emisiones contaminantes.

La contribución del trabajo a esta meta es doble. Por un lado, cuantifica el impacto ambiental de la última milla madrileña y la reducción alcanzable con cada estrategia: la simulación demuestra que la electrificación total del parque reduciría las emisiones de óxidos de nitrógeno en un 95 % y las de partículas de forma igualmente drástica, contaminantes ambos que deterioran directamente la calidad del aire de la ciudad. Por otro, evalúa la reorganización logística mediante microhubs como vía para eliminar la penetración de vehículos pesados en el centro urbano.

Este segundo aspecto, sin embargo, revela una tensión interna que merece ser reconocida. El microhub mejora la calidad del aire del centro, pero lo hace multiplicando por casi cuatro el número de vehículos en circulación y, con ellos, los kilómetros recorridos y la ocupación del viario. Es decir, avanza en la dimensión de contaminación del ODS 11 mientras retrocede, potencialmente, en la de congestión. El trabajo no oculta esta contradicción, sino que la cuantifica, y concluye que el microhub debe concebirse como una medida selectiva y no generalizable, aplicable allí donde el beneficio ambiental compense claramente esa penalización. Esta lectura matizada constituye, en sí misma, una aportación al objetivo: alerta frente a soluciones que, presentadas como sostenibles, podrían agravar otros problemas urbanos si se aplicaran de forma indiscriminada.

A.3 ODS 13. ACCIÓN POR EL CLIMA

La meta 13.2 promueve la incorporación de medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales. El transporte, como único gran sector cuyas emisiones no han descendido respecto a los niveles de 1990 en la Unión Europea, es un ámbito prioritario de esa incorporación.

La aportación del trabajo a este objetivo es directa y cuantitativa. El modelo demuestra que la mera renovación de la flota, aun acelerada, no reduce en absoluto las emisiones de CO₂, y que solo el cambio tecnológico las ataca de forma efectiva: la electrificación total del parque las reduciría en un 83 %, desde las 58.000 hasta unas 10.000 toneladas anuales de la flota de referencia. Este resultado tiene una implicación directa para la planificación climática municipal, pues descarta una de las medidas aparentemente más intuitivas (renovar el parque) como instrumento de mitigación.

Conviene, no obstante, precisar el alcance de esta contribución. El estudio adopta un enfoque Tank-to-Wheel, que contabiliza únicamente las emisiones directas del vehículo y no las asociadas a la generación de la electricidad que consume ni a la fabricación de las baterías. La reducción del 83 % debe entenderse, por tanto, como una reducción de emisiones directas y no de la huella de carbono global, cuya cuantificación completa se apunta como línea de trabajo futura. Reconocer este límite es coherente con el espíritu del propio ODS 13, que exige rigor y no complacencia en la contabilidad climática.

El estudio identifica además un límite tecnológico relevante para este objetivo: el residuo irreductible de emisiones asociado a la cadena de frío, que la electrificación actual no puede eliminar. Señalar dónde la tecnología aún no llega es también una forma de orientar el esfuerzo climático.

A.4 ODS 3. SALUD Y BIENESTAR

La meta 3.9 persigue reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la contaminación del aire, el agua y el suelo. La conexión con este trabajo es inmediata: los óxidos de nitrógeno y las partículas en suspensión que emite la flota de reparto se liberan precisamente en las zonas de mayor densidad de población, donde su impacto sobre la salud es máximo.

El trabajo contribuye a esta meta al caracterizar y cuantificar la evolución de ambos contaminantes bajo las distintas estrategias, y al establecer una jerarquía clara entre ellas. La renovación del parque reduce las partículas en un 93 % gracias a la generalización del filtro, pero deja un suelo de NO_x que la tecnología diésel no puede superar; solo la electrificación rompe ese suelo. Esta distinción es relevante desde la perspectiva de la salud pública, pues indica que las políticas de renovación de flota, aun siendo útiles, no agotan el margen de mejora disponible. El enfoque Tank-to-Wheel adoptado resulta, en este caso, particularmente adecuado, ya que el daño a la salud se produce allí donde se emite el contaminante, esto es, en el punto de circulación del vehículo. La contribución del trabajo a este objetivo es, en consecuencia, la más directa de las cuatro.

A.5 ODS 9. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

La meta 9.4 promueve la modernización de las infraestructuras y la reconversión de las industrias para hacerlas sostenibles, mediante un uso más eficiente de los recursos y una mayor adopción de tecnologías limpias.

La contribución del trabajo se articula en tres planos. En el de la innovación metodológica, aporta un modelo de simulación replicable, cuya arquitectura permite aplicarlo a otras flotas y a otras ciudades mediante la sustitución de sus datos de entrada, y que constituye una herramienta de soporte a la decisión para operadores y administraciones.

En el de la infraestructura energética, dimensiona la red de recarga necesaria para sostener una flota electrificada, demostrando que se resuelve con cargadores de potencia moderada y acometidas de tamaño ordinario, y que su operación en horas valle contribuye a aplanar la curva de demanda del sistema eléctrico en lugar de agravar sus picos. Se trata, por tanto, de una infraestructura que emplea los recursos existentes de forma más eficiente.

En el de la reconversión de infraestructuras urbanas, el modelo de microhub propone transformar aparcamientos subterráneos ya construidos en nodos logísticos de distribución sostenible. Esta reutilización de infraestructura existente, en lugar de la construcción de nuevas instalaciones logísticas en un entorno urbano consolidado, encarna con precisión el principio de uso eficiente de los recursos que la meta 9.4 promueve.

A.6 REFLEXIÓN FINAL

La alineación de este trabajo con la Agenda 2030 no se limita a la coincidencia temática con cuatro objetivos, sino que se manifiesta en el propio enfoque adoptado. El estudio no se conforma con constatar que las tecnologías sostenibles existen, sino que cuantifica qué consiguen realmente, dónde están sus límites y cuánto cuestan, y ello incluye reconocer los casos en que una medida aparentemente sostenible introduce contrapartidas: el microhub y su multiplicación de vehículos, la electrificación y su residuo de cadena de frío, el enfoque Tank-to-Wheel y su contabilidad parcial de la huella.

Esa honestidad en la cuantificación es, en último término, la contribución más valiosa a la Agenda 2030: el desarrollo sostenible no avanza mediante declaraciones de intenciones, sino mediante decisiones informadas, y las decisiones informadas requieren cifras que digan tanto lo que se gana como lo que se pierde. El trabajo aporta, además, una conclusión de relevancia directa para la acción pública: la barrera de la descarbonización de la última milla no es tecnológica, sino económica y estructural, y afecta de forma desigual a los distintos actores del sector. Cualquier política que aspire a un desarrollo sostenible efectivo en este ámbito deberá, por tanto, atender no solo a la tecnología, sino a quién puede permitírsela.

ANEXO B. CÓDIGO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

B1. INTRODUCCIÓN

Este anexo recoge el código fuente del modelo de simulación desarrollado en MATLAB, cuya estructura y fundamento se describen en el Capítulo 4. y cuyos resultados se analizan en el Capítulo 5. . Se incluye con el fin de garantizar la trazabilidad y la reproducibilidad de los resultados presentados en la memoria.

El modelo se ha implementado en un único script, ejecutable directamente sin dependencias externas ni toolboxes adicionales, que contiene tanto el bloque principal como las funciones locales que lo sustentan. Su ejecución completa reproduce la totalidad de los resultados del trabajo: las emisiones y la demanda energética del año base, la evolución de los tres escenarios de descarbonización a lo largo del horizonte 2026-2050 y las figuras que ilustran el Capítulo 5. .

B.2 ESTRUCTURA DEL CÓDIGO

El script se organiza en quince bloques, agrupados en cuatro fases:

Fase 1. Datos de entrada y construcción de la flota (bloques 1 a 7). Se definen los parámetros globales (tamaño de la flota representativa, velocidad urbana, horas de operación y días operativos, de los que se deriva el kilometraje anual) y la tabla de los once tipos de vehículo con sus parámetros técnicos y de emisión. A continuación, se establecen las distribuciones de antigüedad de los tres perfiles de flota (corporativo, envejecido y eléctrico) y las tablas de factores de emisión de NO_x y partículas por norma Euro. Con ello se construye la matriz de flota inicial `Flota(tipo, edad)`, que constituye el estado de partida de la simulación.

Fase 2. Verificación (bloques 5, 7, 8 y 10). El script incorpora comprobaciones automáticas que validan la coherencia de los datos antes de simular: que las cuotas de los tres perfiles suman el 100 %, que la matriz de flota reproduce exactamente el número total de vehículos y que la cadena edad → norma Euro → factor de emisión devuelve los valores esperados para un conjunto de casos de prueba. Se calculan asimismo las emisiones y la energía del año base, que constituyen la línea de referencia del estudio.

Fase 3. Simulación de los escenarios (bloques 11 a 15). Tras empaquetar todos los parámetros en la estructura `P`, se simulan los tres escenarios. El escenario A realiza un barrido de edades de jubilación manteniendo la tecnología; el escenario B fija la edad de corte y varía la tecnología de sustitución (renovación a diésel, electrificación total y mezcla al 50 %); y el escenario C aplica la descomposición por microhub. Cada bloque genera sus figuras y un resumen numérico por consola.

Fase 4. Funciones locales. El script se cierra con las cuatro funciones que implementan el modelo: `factor_emision`, que devuelve los factores de NO_x y PM según la categoría y la edad; `factor_emision_ano`, que aplica el criterio de norma Euro congelada al año de matriculación; `simular`, que ejecuta el bucle temporal de envejecimiento, jubilación y

renovación; renovar, que implementa las reglas de sustitución de cada escenario; y emisiones, que agrega las emisiones y la energía de la flota en un año dado.

B.3 PARÁMETROS AJUSTABLES

El código se ha estructurado de modo que los parámetros que condicionan los resultados queden aislados y sean directamente editables, lo que permite reproducir el estudio bajo otras hipótesis o aplicarlo a otra ciudad sin modificar la lógica del modelo. Los principales son:

Tabla 20: Parámetros ajustables del modelo de simulación – Fuente: elaboración propia

Parámetro	Variable	Valor adoptado
Tamaño de la flota representativa	N_total	10.000 vehículos
Velocidad efectiva urbana	v_kmh	15 km/h
Horas de operación diaria	h_día	6 h
Días operativos anuales	d_ano	250 días
Año base y horizonte	ano_base, ano_fin	2026 - 2050
Edad de jubilación de referencia	edad_jub	12 años
Edades de corte del escenario A	edades_corte	8, 10, 12, 15, 20 años
Fracción de flota que opera en el centro	P.frac_centro	0,30

Como se expuso en el apartado 9.4, el tamaño de la flota actúa como simple factor de escala: modificar N_total altera proporcionalmente todas las magnitudes absolutas, sin afectar a los resultados relativos.

B.4 CÓDIGO FUENTE

```
%% =====
% MODELO DE SIMULACION - DESCARBONIZACION ULTIMA MILLA MADRID
% Paso 1: Parametros de entrada
% Ano base: 2026
% (El script se construye por bloques; este es el primero.)
% =====
clear; clc;

%% 1. PARAMETROS GLOBALES (aislados y editables)
N_total = 10000; % n total de vehiculos (flota representativa)
v_kmh = 15; % velocidad efectiva urbana [km/h]
h_dia = 6; % horas de operacion al dia [h]
d_ano = 250; % dias operativos al ano [dias]
km_ano = v_kmh * h_dia * d_ano; % distancia anual por vehiculo [km] = 22500

ano_base = 2026; % ano de referencia
edad_max = 30; % edad maxima, cierre de la cola ">20" [anos]
```

```
% Factores de CO2 del combustible [kg CO2 / L] (informativos; el CO2/km ya esta
tabulado)
f_co2_diesel    = 2.64;
f_co2_gasolina  = 2.39;

%% 2. TIPOS DE VEHICULO: parametros tecnicos y descomposicion por perfil
% Consumo : L/100km (combustion) o kWh/100km (electrico)
% CO2      : g/km del vehiculo de referencia (0 en electricos)
% Bateria  : kWh (0 en combustion)  Autonomia : km (0 en combustion)
% Pct*     : % sobre la flota TOTAL asignado a cada perfil de edad
% CatEuro  : tabla de factores Euro aplicable (furgonetas/camiones/motos/none)

Tipo = { ...
    'Furgones diesel L2H2'; ...
    'Camiones rigidos diesel'; ...
    'Furgones frigorificos diesel'; ...
    'Motos de combustion'; ...
    'Camiones rigidos frigorificos diesel'; ...
    'Furgonetas diesel L1H1'; ...
    'Furgones electricos L2H2'; ...
    'Furgonetas electricas L1H1'; ...
    'Motos electricas'; ...
    'Microdistribucion (Scoobic)'; ...
    'Camiones electricos 16t' };

Tecnologia = { 'diesel'; 'diesel'; 'diesel'; 'gasolina'; 'diesel'; 'diesel'; ...
               'electrico'; 'electrico'; 'electrico'; 'electrico'; 'electrico' };

Consumo      = [10.0; 22.0; 12.0; 3.0; 26.0; 6.0; 30.8; 22.7; 4.1; 5.3; 106]; %
               L o kWh /100km
CO2           = [ 264; 581; 317; 72; 686; 158; 0; 0; 0; 0; 0]; %
               g/km
Bateria       = [ 0; 0; 0; 0; 0; 0; 75; 50; 5.6; 4.8; 265]; %
               kWh
Autonomia     = [ 0; 0; 0; 0; 0; 0; 245; 220; 137; 90; 250]; %
               km

PctCorp       = [46.27; 5.32; 5.32; 4.73; 2.07; 2.10; 0; 0; 0; 0; 0];
PctEnv        = [15.34; 2.28; 2.28; 0.00; 0.89; 0.00; 0; 0; 0; 0; 0];
PctElec       = [ 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 5.51; 3.89; 1.89; 1.69; 0.42];

CatEuro       = { 'furgonetas'; 'camiones'; 'furgonetas'; 'motos'; 'camiones'; 'furgonetas';
...
               'none'; 'none'; 'none'; 'none'; 'none' };

veh = table(Tipo, Tecnologia, Consumo, CO2, Bateria, Autonomia, ...
            PctCorp, PctEnv, PctElec, CatEuro);

n_tipos = height(veh);

%% 3. DISTRIBUCIONES DE EDAD POR PERFIL
% Bandas de edad [edad_min edad_max] (ambas inclusive) y % en cada banda.
bandas = [ 0 4;
           5 9;
          10 14;
          15 19;
          20 edad_max ];

dist_corp     = [75 20 5 0 0] / 100; % perfil corporativo (joven)
dist_env      = [15 17 20 24 24] / 100; % perfil envejecido (ANFAC)

% Perfil electrico: uniforme entre 0 y 5 anos (se expandira en el Paso 2)
elec_edad_min = 0;
elec_edad_max = 5;
```

```

%% 4. FACTORES DE EMISION POR NORMA EURO [edad_min edad_max NOx(g/km) PM(g/km)]
% Fuente: EMEP/EEA Guidebook 2023. Rangos de edad referidos al año base 2026.
euro_furgonetas = [ ...
    0   5   0.142   1.93e-4;    % Euro 6 d/e
    6   8   0.512   1.93e-4;    % Euro 6 d-temp
    9  11   1.108   1.93e-4;    % Euro 6 a/b/c
   12  15   1.374   2.01e-4;    % Euro 5
   16  20   0.839   4.59e-2;    % Euro 4
   21  99   1.037   8.52e-2 ]; % Euro 3 (y anterior)

euro_camiones = [ ...
    0   7   0.315   2.38e-3;    % Euro VI d/e
    8  13   0.409   2.38e-3;    % Euro VI a/b/c
   14  18   3.035   2.41e-2;    % Euro V
   19  21   3.525   2.64e-2;    % Euro IV
   22  99   5.101   1.13e-1 ]; % Euro III (y anterior)

euro_motos = [ ...
    0   6   0.022   8.75e-4;    % Euro 5
    7  10   0.033   8.75e-4;    % Euro 4
   11  99   0.068   5.00e-3 ]; % Euro 3 (y anterior)

%% 5. VERIFICACION RAPIDA DE LOS DATOS
% Comprueba que las cuotas suman 100 % y cuadran con los pesos de cada perfil.
tot_por_tipo = veh.PctCorp + veh.PctEnv + veh.PctElec;

fprintf('--- Verificacion de datos de entrada ---\n');
fprintf('Suma total de cuotas : %6.2f %% (debe ser 100.00)\n',
sum(tot_por_tipo));
fprintf('Perfil corporativo      : %6.2f %% (esperado 65.81)\n', sum(veh.PctCorp));
fprintf('Perfil envejecido         : %6.2f %% (esperado 20.79)\n', sum(veh.PctEnv));
fprintf('Perfil electrico          : %6.2f %% (esperado 13.40)\n', sum(veh.PctElec));
fprintf('km/año por vehiculo       : %6d km\n', km_año);
fprintf('N total de vehiculos      : %6d\n', N_total);

% Aviso si la suma no cuadra (tolerancia por redondeo de los porcentajes)
if abs(sum(tot_por_tipo) - 100) > 0.05
    warning('Las cuotas no suman 100%. Revisa PctCorp/PctEnv/PctElec.');
```

```

end

%% 6. CONSTRUCCION DE LA FLOTA INICIAL Flota(tipo, edad)
% Matriz de n_tipos filas x (edad_max+1) columnas.
% Columna j -> edad (j-1) [la columna 1 es la edad 0].
% Cada tipo reparte sus vehiculos entre las edades segun el perfil que le
% corresponde (corporativo y/o envejecido en combustion; uniforme en
electricos).
edades = 0:edad_max; % 0,1,...,30 -> 31 columnas
n_edades_tot = numel(edades); % 31
Flota = zeros(n_tipos, n_edades_tot);
n_bandas = size(bandas, 1);

for i = 1:n_tipos
    % Vehiculos de este tipo en cada perfil
    n_corp = N_total * veh.PctCorp(i) / 100;
    n_env = N_total * veh.PctEnv(i) / 100;
    n_elec = N_total * veh.PctElec(i) / 100;

    fila = zeros(1, n_edades_tot); % acumulador de edades de este tipo

    % --- Perfiles de combustion: reparto por bandas (uniforme dentro de cada
banda) ---
    for b = 1:n_bandas
        e_min = bandas(b, 1);
        e_max = bandas(b, 2);
        n_en_banda = e_max - e_min + 1; % nº de edades de la banda (5, o 11
en ">20")
    end
end

```

```
cols      = (e_min:e_max) + 1;      % columnas (edad 0 -> col 1)

fila(cols) = fila(cols) + n_corp * dist_corp(b) / n_en_banda;
fila(cols) = fila(cols) + n_env * dist_env(b) / n_en_banda;
end

% --- Perfil electrico: uniforme entre elec_edad_min y elec_edad_max ---
cols_e     = (elec_edad_min:elec_edad_max) + 1;
fila(cols_e) = fila(cols_e) + n_elec / numel(cols_e);

Flota(i, :) = fila;
end

%% 7. VERIFICACION DE LA FLOTA INICIAL
total_flota = sum(Flota(:));
pct_por_tipo_calc = sum(Flota, 2) / N_total * 100;    % recuperado por tipo

fprintf('\n--- Verificacion de la flota inicial ---\n');
fprintf('Total de vehiculos en la matriz : %.2f (debe ser %d)\n', total_flota,
N_total);
fprintf('%-40s %8s %8s\n', 'Tipo', 'Calc %', 'Tabla %');
for i = 1:n_tipos
    fprintf('%-40s %7.2f %7.2f\n', veh.Tipo{i}, pct_por_tipo_calc(i),
tot_por_tipo(i));
end

if abs(total_flota - N_total) > 1e-6
    warning('La suma de la matriz Flota no coincide con N_total.');
```

```
end

%% 8. VALIDACION DE LA FUNCION factor_emision (casos de prueba)
% Comprueba que la cadena edad -> norma Euro -> factor devuelve lo esperado.
casos = { 'furgonetas', 3;      % Euro 6 d/e -> NOx 0.142
          'furgonetas', 14;     % Euro 5      -> NOx 1.374
          'furgonetas', 25;     % Euro 3      -> NOx 1.037
          'camiones', 10;       % Euro VI abc -> NOx 0.409
          'camiones', 20;       % Euro IV     -> NOx 3.525
          'motos', 8;           % Euro 4      -> NOx 0.033
          'none', 5 };          % electrico  -> NOx 0

fprintf('\n--- Validacion de factor_emision ---\n');
fprintf('%-12s %5s %12s %14s\n', 'Categoria', 'Edad', 'NOx (g/km)', 'PM (g/km)');
for k = 1:size(casos, 1)
    [nx, pm] = factor_emision(casos{k,1}, casos{k,2}, ...
euro_furgonetas, euro_camiones, euro_motos);
    fprintf('%-12s %5d %12.3f %14.2e\n', casos{k,1}, casos{k,2}, nx, pm);
end

%% 9. EMISIONES Y ENERGIA DEL AÑO BASE (2026)
% Recorre la matriz Flota aplicando los factores de emision y de consumo.
CO2_g = 0; NOx_g = 0; PM_g = 0;      % acumuladores de emisiones [g/año]
kWh = 0; L_comb = 0;                 % energia [kWh/año] y combustible [L/año]

CO2_tipo = zeros(n_tipos, 1);        % desglose por tipo [g/año]
NOx_tipo = zeros(n_tipos, 1);
PM_tipo = zeros(n_tipos, 1);

for i = 1:n_tipos
    cat = veh.CatEuro{i};
    tec = veh.Tecnologia{i};
    for j = 1:n_edades_tot
        n = Flota(i, j);
        if n == 0, continue; end
        edad = j - 1;

        % CO2 (constante por tipo)
```

```

        co2 = veh.CO2(i) * km_ano * n;

        % NOx y PM (dependen de la edad via norma Euro)
        [fNOx, fPM] = factor_emision(cat, edad, euro_furgonetas, euro_camiones,
euro_motos);
        nox = fNOx * km_ano * n;
        pm = fPM * km_ano * n;

        % Energia electrica o combustible
        if strcmp(tec, 'electrico')
            kWh = kWh + veh.Consumo(i)/100 * km_ano * n;
        else
            L_comb = L_comb + veh.Consumo(i)/100 * km_ano * n;
        end

        CO2_g = CO2_g + co2;    NOx_g = NOx_g + nox;    PM_g = PM_g + pm;
        CO2_tipo(i) = CO2_tipo(i) + co2;
        NOx_tipo(i) = NOx_tipo(i) + nox;
        PM_tipo(i) = PM_tipo(i) + pm;
    end
end

% Conversion a unidades legibles
CO2_t = CO2_g / 1e6;    % toneladas/año
NOx_kg = NOx_g / 1e3;    % kg/año
PM_kg = PM_g / 1e3;    % kg/año
MWh = kWh / 1e3;    % MWh/año

%% 10. RESULTADOS DEL AÑO BASE
fprintf('\n=== EMISIONES Y ENERGIA - AÑO BASE %d ===\n', ano_base);
fprintf('Flota: %d vehiculos | %d km/año cada uno\n', N_total, km_ano);
fprintf('CO2 : %10.1f t/año\n', CO2_t);
fprintf('NOx : %10.1f kg/año\n', NOx_kg);
fprintf('PM : %10.1f kg/año\n', PM_kg);
fprintf('Energia electrica : %10.1f MWh/año\n', MWh);
fprintf('Combustible : %10.0f L/año\n', L_comb);

% Desglose de NOx por tipo (donde se concentra el problema)
fprintf('\nNOx por tipo (kg/año):\n');
for i = 1:n_tipos
    if NOx_tipo(i) > 0
        fprintf(' %-38s %9.1f\n', veh.Tipo{i}, NOx_tipo(i)/1e3);
    end
end

%% 11. PARAMETROS DE LA SIMULACION TEMPORAL
ano_fin = 2050;
anos = ano_base:ano_fin;
n_anos = numel(anos);
EDAD_SIM_MAX = 60;    % array de edades ampliado para permitir el envejecimiento
edad_jub = 12;    % edad de corte de referencia [anos] (escenario B)

%% 12. EMPAQUETADO DE PARAMETROS PARA LA SIMULACION
% Se agrupan en la struct P para pasarlos a la funcion simular().
% Mapa de electrificación: tipo de combustion -> tipo electrico equivalente.
% Los frigorificos (3 y 5) NO son electrificables: se mapean a si mismos
(diesel).
% Indices: 1 L2H2d 2 Crigd 3 Ffrigd 4 Motod 5 Cfrigd 6 L1H1d
%          7 eL2H2 8 eL1H1 9 eMoto 10 Scoobic 11 eCam
map_elec = [7; 11; 3; 9; 5; 8; 7; 8; 9; 10; 11];

P.n_tipos = n_tipos;
P.EDAD_SIM_MAX = EDAD_SIM_MAX;
P.n_edades_tot = n_edades_tot;
P.Flota0 = Flota;
P.km_ano = km_ano;

```

```
P.ano_base      = ano_base;
P.anos         = anos;
P.n_anos       = n_anos;
P.CO2          = veh.CO2;
P.Consumo      = veh.Consumo;
P.Tecnologia   = veh.Tecnologia;
P.CatEuro      = veh.CatEuro;
P.euro_furg    = euro_furgonetas;
P.euro_cam     = euro_camiones;
P.euro_mot     = euro_motos;
P.map_elec     = map_elec;

% Parametros del escenario C (microhub)
P.tipo_L2H2    = 1;          % indice del furgon diesel L2H2
P.tipo_camion  = 2;          % indice del camion rigido diesel
P.frac_centro  = 0.30;       % fraccion que opera en el centro y se descompone
% Recetas de descomposicion por volumen (vehiculos pequenos por cada grande):
% eL1H1 = tipo 8, Scoobic = tipo 10
receta_furgon = zeros(n_tipos,1); receta_furgon(8) = 2; receta_furgon(10) = 1; %
2 eL1H1 + 1 Scoobic (10.0 m3)
receta_camion = zeros(n_tipos,1); receta_camion(8) = 8; receta_camion(10) = 2; %
8 eL1H1 + 2 Scoobic (35.6 m3)
P.receta_furgon = receta_furgon;
P.receta_camion = receta_camion;

%% 13. ESCENARIO A - TIEMPO DE RENOVACION
% Barrido de edades de corte; siempre se sustituye por el MISMO tipo (nuevo).
edades_corte = [8 10 12 15 20];
nA = numel(edades_corte);
A_CO2 = zeros(nA, n_anos);
A_NOx = zeros(nA, n_anos);
A_PM = zeros(nA, n_anos);

for s = 1:nA
    [A_CO2(s,:), A_NOx(s,:), A_PM(s,:)] = simular(edades_corte(s), 'mismo_tipo',
0, P);
end

% Panel 3x1: CO2, NOx y PM a lo largo del tiempo para cada edad de corte
legLabels = arrayfun(@(x) sprintf('Corte %d anos', x), edades_corte, ...
    'UniformOutput', false);

figure;

subplot(3,1,1);
plot(anos, A_CO2, 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('CO_2 [t/ano]'); ylim([0 65000]);
title('Escenario A: evolucion de las emisiones segun la edad de renovacion');
legend(legLabels, 'Location', 'best');

subplot(3,1,2);
plot(anos, A_NOx, 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('NO_x [kg/ano]'); ylim([0 95000]);

subplot(3,1,3);
semilogy(anos, A_PM, 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('PM [kg/ano] (log)'); xlabel('Ano');

% Resumen numerico (NOx en anos clave)
anos_muestra = [2026 2030 2040 2050];
fprintf('\n--- Escenario A: NOx [kg/ano] ---\n');
fprintf('%-12s', 'Edad corte');
fprintf('%10d', anos_muestra); fprintf('\n');
for s = 1:nA
    fprintf('%-12d', edades_corte(s));
    for a = anos_muestra
        fprintf('%10.0f', A_NOx(s, anos == a));
```

```
end
fprintf('\n');
end

%% 14. ESCENARIO B - VEHICULO DE RENOVACION (corte fijo a edad_jub anos)
% Compara la tecnologia de sustitucion: renovar a diesel (referencia de A),
% todo electrico, y mezcla 50%. Los frigorificos no se electrifican.
[B0_CO2, B0_NOx, B0_PM, B0_MWh] = simular(edad_jub, 'mismo_tipo', 0, P); % ref.
A
[Be_CO2, Be_NOx, Be_PM, Be_MWh] = simular(edad_jub, 'electrico', 0, P); % todo
elec.
[Bm_CO2, Bm_NOx, Bm_PM, Bm_MWh] = simular(edad_jub, 'mezcla', 0.5, P); %
mezcla 50%

labB = {'Renovar a diesel (A)', 'Todo electrico', 'Mezcla 50%'};

% Panel 3x1 de emisiones (CO2, NOx, PM)
figure;
subplot(3,1,1);
plot(anos, [B0_CO2; Be_CO2; Bm_CO2]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('CO_2 [t/ano]'); ylim([0 65000]);
title(sprintf('Escenario B: tecnologia de renovacion (corte a %d anos)',
edad_jub));
legend(labB, 'Location', 'best');
subplot(3,1,2);
plot(anos, [B0_NOx; Be_NOx; Bm_NOx]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('NO_x [kg/ano]'); ylim([0 95000]);
subplot(3,1,3);
semilogy(anos, [B0_PM; Be_PM; Bm_PM]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('PM [kg/ano] (log)'); xlabel('Ano');

% Figura de demanda de energia electrica
figure;
plot(anos, [B0_MWh; Be_MWh; Bm_MWh]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
xlabel('Ano'); ylabel('Energia electrica [MWh/ano]');
title('Escenario B: demanda de energia electrica');
legend(labB, 'Location', 'best');

% Resumen numerico por metrica
ms = [2030 2040 2050];
metr = { 'CO2 [t/ano]', {B0_CO2, Be_CO2, Bm_CO2};
'NOx [kg/ano]', {B0_NOx, Be_NOx, Bm_NOx};
'PM [kg/ano]', {B0_PM, Be_PM, Bm_PM};
'Energia [MWh/ano]', {B0_MWh, Be_MWh, Bm_MWh} };
for m = 1:size(metr, 1)
    fprintf('\n--- Escenario B: %s ---\n', metr{m,1});
    fprintf('%-22s', 'Estrategia'); fprintf('%10d', ms); fprintf('\n');
    d = metr{m,2};
    for r = 1:3
        fprintf('%-22s', labB{r});
        for a = ms, fprintf('%10.1f', d{r}(anos == a)); end
        fprintf('\n');
    end
end

%% 15. ESCENARIO C - COMPOSICION DEL PARQUE (microhub)
% Los vehiculos grandes que operan en el centro (frac_centro) se descomponen
% en una combinacion equivalente en volumen de vehiculos pequenos electricos.
% Al fragmentar, la flota crece y con ella los km totales (desconsolidacion).
% Se compara con A (diesel) y B (todo electrico) del mismo corte.
[Ca_CO2, Ca_NOx, Ca_PM, Ca_MWh, ~, Ca_N] = simular(edad_jub, 'mismo_tipo', 0, P);
% A ref
[Cb_CO2, Cb_NOx, Cb_PM, Cb_MWh, ~, Cb_N] = simular(edad_jub, 'electrico', 0, P);
% B ref
[Cc_CO2, Cc_NOx, Cc_PM, Cc_MWh, ~, Cc_N] = simular(edad_jub, 'microhub', 0, P);
% C
```

```
labC = {'Renovar a diesel (A)', 'Todo electrico (B)', 'Microhub (C)'};

% Panel de emisiones (CO2, NOx, PM)
figure;
subplot(3,1,1);
plot(anos, [Ca_CO2; Cb_CO2; Cc_CO2]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('CO_2 [t/ano]'); ylim([0 65000]);
title('Escenario C: microhub frente a renovacion y electrificacion');
legend(labC, 'Location', 'best');
subplot(3,1,2);
plot(anos, [Ca_NOx; Cb_NOx; Cc_NOx]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('NO_x [kg/ano]'); ylim([0 95000]);
subplot(3,1,3);
semilogy(anos, [Ca_PM; Cb_PM; Cc_PM]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('PM [kg/ano] (log)'); xlabel('Ano');

% Figura de energia y de tamano de flota (la firma de la desconsolidacion)
figure;
subplot(2,1,1);
plot(anos, [Ca_MWh; Cb_MWh; Cc_MWh]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('Energia [MWh/ano]');
title('Escenario C: demanda de energia y tamano de flota');
legend(labC, 'Location', 'best');
subplot(2,1,2);
plot(anos, [Ca_N; Cb_N; Cc_N]', 'LineWidth', 1.5); grid on;
ylabel('N de vehiculos'); xlabel('Ano');

% Resumen numerico
msC = [2030 2040 2050];
metrC = { 'CO2 [t/ano]',          {Ca_CO2, Cb_CO2, Cc_CO2};
          'NOx [kg/ano]',        {Ca_NOx, Cb_NOx, Cc_NOx};
          'Energia [MWh/ano]',   {Ca_MWh, Cb_MWh, Cc_MWh};
          'N de vehiculos',      {Ca_N, Cb_N, Cc_N} };
for m = 1:size(metrC, 1)
    fprintf('\n--- Escenario C: %s ---\n', metrC{m,1});
    fprintf('%-22s', 'Estrategia'); fprintf('%10d', msC); fprintf('\n');
    d = metrC{m,2};
    for r = 1:3
        fprintf('%-22s', labC{r});
        for a = msC, fprintf('%10.1f', d{r}(anos == a)); end
        fprintf('\n');
    end
end
fprintf('Flota A (2050): %.0f\n', Ca_N(anos==2050));
fprintf('Flota C (2050): %.0f\n', Cc_N(anos==2050));
fprintf('Multiplicador: %.2f\n', Cc_N(anos==2050)/Ca_N(anos==2050));
%% =====
% FUNCIONES LOCALES (deben ir al final del archivo)
% =====
function [NOx, PM] = factor_emision(cat_euro, edad, euro_furg, euro_cam,
euro_mot)
%FACTOR_EMISION Factores de NOx y PM [g/km] segun categoria Euro y edad.
% Los vehiculos electricos (cat_euro = 'none') devuelven 0.

% Electricos: cero emisiones directas (Tank-to-Wheel)
if strcmp(cat_euro, 'none')
    NOx = 0; PM = 0;
    return;
end

% Seleccion de la tabla de factores segun la categoria
switch cat_euro
case 'furgonetas'
    tabla = euro_furg;
case 'camiones'
```

```
        tabla = euro_cam;
    case 'motos'
        tabla = euro_mot;
    otherwise
        error('Categoria Euro desconocida: %s', cat_euro);
end

% Fila cuyo rango [edad_min edad_max] contiene la edad
fila = find(edad >= tabla(:,1) & edad <= tabla(:,2), 1);
if isempty(fila)
    error('Edad %d fuera de los rangos de la tabla Euro.', edad);
end
NOx = tabla(fila, 3);
PM = tabla(fila, 4);
end

function [NOx, PM] = factor_emision_ano(cat_euro, edad, sim_year, ano_base, ...
    euro_furg, euro_cam, euro_mot)
%FACTOR_EMISION_ANO Factor con la norma Euro CONGELADA al ano de matriculacion.
% Un vehiculo conserva su norma Euro toda su vida: no se ensucia al envejecer.
% edad_equiv traslada la edad al ano base 2026 conservando el ano de matricula.
% Los vehiculos matriculados despues del ano base reciben la norma mas reciente
% (edad_equiv = 0), ya que no hay factores Euro 7 tabulados.
    edad_equiv = max(0, edad - (sim_year - ano_base));
    [NOx, PM] = factor_emision(cat_euro, edad_equiv, euro_furg, euro_cam,
euro_mot);
end

function [CO2s, NOxs, PMs, MWhs, Ls, Ns] = simular(edad_jub, modo, pct_elec, P)
%SIMULAR Evolucion temporal de la flota bajo una regla de renovacion.
% edad_jub : edad de jubilacion [anos]
% modo      : 'mismo_tipo' (esc. A) | 'electrico' | 'mezcla' (esc. B)
% pct_elec  : fracción electrica en modo 'mezcla' (0..1)
% P         : struct con todos los parametros y datos
    F = zeros(P.n_tipos, P.EDAD_SIM_MAX + 1);
    F(:, 1:P.n_edades_tot) = P.Flota0;
    CO2s = zeros(1, P.n_anos); NOxs = CO2s; PMs = CO2s; MWhs = CO2s; Ls = CO2s;
    Ns = CO2s;

    for k = 1:P.n_anos
        y = P.anos(k);
        if k > 1
            F = [zeros(P.n_tipos, 1), F(:, 1:end-1)]; % envejecer: edad +1
            col = edad_jub + 1;
            ret = sum(F(:, col:end), 2); % jubilados por tipo
            F(:, col:end) = 0;
            F = renovar(F, ret, modo, pct_elec, P); % renovar segun el modo
        end
        [CO2s(k), NOxs(k), PMs(k), MWhs(k), Ls(k), Ns(k)] = emisiones(F, y, P);
    end
end

function F = renovar(F, ret, modo, pct_elec, P)
%RENOVAR Reincorpora los vehiculos jubilados como nuevos (edad 0) segun el modo.
    switch modo
        case 'mismo_tipo' % Escenario A: mismo tipo, nuevo
            F(:, 1) = F(:, 1) + ret;
        case 'electrico' % Escenario B rama 1: todo electrico
            for i = 1:P.n_tipos
                F(P.map_elec(i), 1) = F(P.map_elec(i), 1) + ret(i);
            end
        case 'mezcla' % Escenario B rama 2: fraccion
            electrica
                for i = 1:P.n_tipos
                    dest = P.map_elec(i);
                    if dest == i % no electrificable o ya electrico
```

```

        F(i, 1) = F(i, 1) + ret(i);
    else
        F(dest, 1) = F(dest, 1) + pct_elec * ret(i);
        F(i, 1) = F(i, 1) + (1 - pct_elec) * ret(i);
    end
end
case 'microhub' % Escenario C: descomposicion por
microhub
    for i = 1:P.n_tipos
        if i == P.tipo_L2H2
            F(:,1) = F(:,1) + P.frac_centro * ret(i) * P.receta_furgon;
            F(i,1) = F(i,1) + (1 - P.frac_centro) * ret(i);
        elseif i == P.tipo_camion
            F(:,1) = F(:,1) + P.frac_centro * ret(i) * P.receta_camion;
            F(i,1) = F(i,1) + (1 - P.frac_centro) * ret(i);
        else
            F(i,1) = F(i,1) + ret(i);
        end
    end
    otherwise
        error('Modo de renovacion desconocido: %s', modo);
    end
end

function [CO2t, NOxkg, PMkg, MWh, L, Ntot] = emisiones(F, y, P)
%EMISIONES Totales anuales de la flota F en el ano y (Euro congelada).
C = 0; Nx = 0; Pm = 0; kwh = 0; L = 0;
for i = 1:P.n_tipos
    cat = P.CatEuro{i};
    tec = P.Tecnologia{i};
    for j = 1:(P.EDAD_SIM_MAX + 1)
        n = F(i, j);
        if n == 0, continue; end
        edad = j - 1;
        C = C + P.CO2(i) * P.km_ano * n;
        [fN, fP] = factor_emision_ano(cat, edad, y, P.ano_base, ...
            P.euro_furg, P.euro_cam, P.euro_mot);
        Nx = Nx + fN * P.km_ano * n;
        Pm = Pm + fP * P.km_ano * n;
        if strcmp(tec, 'electrico')
            kwh = kwh + P.Consumo(i)/100 * P.km_ano * n;
        else
            L = L + P.Consumo(i)/100 * P.km_ano * n;
        end
    end
end
CO2t = C/1e6; NOxkg = Nx/1e3; PMkg = Pm/1e3; MWh = kwh/1e3; Ntot = sum(F(:));
end

```