



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER SOLUCIONES SOSTENIBLES PARA LA MOVILIDAD FUTURA

Autor: Delgado Martín de Blas, Gonzalo

Director: González González, Javier

Codirector: Arbery Campos, Mario Esteban

Madrid



Fdo.: Gonzalo Delgado Martín de Blas Fecha:13/08/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: González González, Javier

Fecha:13/08/ 2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Arbery Campos, Mario Esteban

Fecha:13 /08/ 2025

SOLUCIONES SOSTENIBLES PARA LA MOVILIDAD FUTURA

Autor: Delgado Martín de Blas, Gonzalo

Director: González González, Javier

Codirector: Arbery Campos, Mario Esteban

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo Fin de Máster presenta un modelo circular para la gestión de baterías eléctricas que responde al desafío urgente de una movilidad urbana más sostenible. La propuesta se basa en la reutilización en cascada de baterías, prolongando su vida útil mediante su uso secuencial en vehículos eléctricos, sistemas de micromovilidad y almacenamiento estacionario.

Gracias a esta estrategia, se logra una reducción de hasta un 40 % en emisiones de CO₂ por batería, una disminución del 70 % en residuos eléctricos, y una fuerte reducción en la demanda de materiales críticos como litio, cobalto y níquel. El sistema está soportado por un diseño modular tipo “matrioska” y protocolos abiertos que permiten el diagnóstico, reacondicionamiento y redistribución eficiente de las celdas en función de su nivel de degradación.

El modelo ha sido validado mediante una simulación computacional en Python, que reproduce todo el ciclo de vida técnico y energético de las baterías, y se ha acompañado de un análisis económico que proyecta una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 14 %, con ingresos acumulados de 30 millones de euros en 6 años, frente a una inversión inicial de 7,98 millones.

Además, se demuestra su viabilidad urbana al integrarse con modelos de ciudad de 15 minutos, hubs logísticos de micromovilidad y redes de transporte autónomo, permitiendo

que cada bicicleta o scooter compartido sustituya hasta 12 vehículos privados. El sistema es también compatible con tecnologías futuras como baterías de estado sólido, litio-azufre o sodio-ion, lo que refuerza su escalabilidad y resiliencia tecnológica.

En conjunto, el trabajo propone una solución concreta, rentable y escalable que combina ingeniería, economía y urbanismo para avanzar hacia una movilidad verdaderamente sostenible.

Palabras clave

Movilidad eléctrica, baterías, reutilización en cascada, economía circular, urbanismo, simulación, sostenibilidad

1. Introducción

El transporte genera más del **25 % de las emisiones globales** de gases de efecto invernadero, y en muchas ciudades europeas es la principal fuente de contaminación. Aunque la electrificación del parque móvil es clave para reducir estas emisiones, la sostenibilidad del modelo depende en gran parte de la **gestión de las baterías**, elemento central de la nueva movilidad.

El sistema actual sigue un enfoque **lineal**, donde las baterías se reciclan tras su uso en automoción, incluso cuando conservan capacidad útil. Esto genera un elevado desperdicio de materiales críticos, como litio y cobalto, además de costes innecesarios y presión ambiental.

Este TFM propone una **solución circular basada en la reutilización en cascada**, que permite alargar la vida útil de cada batería a más de **7 años**, redistribuyéndola hacia usos menos exigentes como la micromovilidad o el almacenamiento estacionario. La propuesta combina **diseño modular**, simulación computacional y análisis económico, demostrando su **viabilidad técnica y rentabilidad** con una **TIR del 14 %** y un fuerte potencial de escalabilidad urbana.

2. Definición del proyecto

Este trabajo se estructura en cinco bloques complementarios que, en conjunto, permiten evaluar la viabilidad técnica, económica y urbana de un modelo circular de gestión de baterías:

- **Diagnóstico del problema:** se analiza el mercado de baterías eléctricas, las tecnologías existentes y las externalidades del modelo lineal actual, con especial atención a la presión sobre materiales críticos y la generación de residuos.
- **Diseño de la solución tecnológica:** se desarrolla un modelo de **reutilización en cascada**, basado en un encapsulado modular y protocolos de testeo que permiten redirigir las baterías hacia nuevos usos según su nivel de degradación.
- **Análisis económico-financiero:** se modelan flujos de caja, costes (CAPEX/OPEX) e ingresos, obteniendo una **TIR del 14 %** en seis años para una inversión inicial de **7,98 millones de euros**.
- **Evaluación ambiental:** se estiman **ahorros del 40 % en emisiones de CO₂ por batería**, una reducción del **70 % en residuos eléctricos**, y una menor demanda de litio, cobalto y níquel.
- **Integración urbana y gobernanza:** se estudia la aplicación del sistema en entornos reales, vinculándolo con estrategias de **micromovilidad, ciudades de 15 minutos**, transporte autónomo y gestión inteligente del espacio público.

Este enfoque multidisciplinar permite no solo validar la rentabilidad del modelo, sino también proponer una infraestructura operativa compatible con las transiciones energética, urbana y digital que marcan la agenda europea actual.

3. Descripción del sistema

Diseño del modelo de economía circular: reutilización en cascada de baterías

Este trabajo propone un modelo circular de gestión de baterías eléctricas centrado en la reutilización en cascada, con el objetivo de alargar su vida útil y maximizar su rendimiento económico y ambiental. En lugar del esquema lineal tradicional —donde las baterías se destinan a reciclaje o eliminación tras su primer uso—, el modelo plantea un sistema de reasignación progresiva en función del estado de degradación de cada unidad.

La batería inicia su ciclo en un vehículo eléctrico urbano de alta rotación (carsharing), donde opera en condiciones exigentes que requieren elevada autonomía y potencia. Al descender por debajo de un umbral de capacidad útil —sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad—, la batería es retirada de circulación, evaluada mediante un sistema de diagnóstico predictivo y reacondicionada. Esta primera transición permite su paso a un segundo uso en vehículos de micromovilidad como scooters, bicicletas o patinetes eléctricos, donde las exigencias de carga, descarga y autonomía son significativamente menores.

La tercera fase comienza cuando la batería presenta una degradación más avanzada, pero aún conserva capacidad para usos de baja intensidad. En esta etapa, se destina a sistemas de almacenamiento energético estacionario, como apoyo en infraestructuras urbanas (por ejemplo, estaciones de recarga, edificios inteligentes o instalaciones solares). En estos entornos, su función es estabilizar redes locales, amortiguar picos de demanda o almacenar energía renovable, sin necesidad de alta densidad energética ni ciclos rápidos.

Este enfoque permite ampliar la vida útil media de cada batería hasta los 7 años, en comparación con los 3-4 años habituales en entornos urbanos intensivos. A lo largo de su ciclo, la batería entrega un volumen mayor de energía útil aprovechable, lo que se traduce en una reducción estimada del 35 % en el coste por kWh útil, frente al modelo lineal. Este ahorro no solo reduce los costes operativos del sistema, sino que mejora su retorno de inversión y facilita su adopción en ciudades con alta densidad de vehículos eléctricos y políticas de incentivos verdes.

El modelo ha sido validado mediante una simulación computacional desarrollada en Python. Esta herramienta integra curvas de degradación, parámetros de uso, costes de reacondicionamiento y redistribución, y permite visualizar la evolución de cada batería en el tiempo. Se ha calculado el coste energético nivelado (LCOE), los ingresos proyectados, las emisiones evitadas y los ratios de eficiencia por etapa, todo ello bajo supuestos conservadores que permiten escalar la solución a diferentes entornos urbanos.

Para asegurar la viabilidad operativa del modelo, se ha desarrollado además un diseño modular tipo “matrioska”, basado en celdas estandarizadas y encapsulados intercambiables. Esta arquitectura permite:

- Diagnóstico automático en puntos de recarga y mantenimiento.
- Recambio rápido según tipo de vehículo o instalación.

- Compatibilidad entre generaciones, marcas y tecnologías de batería.

Este sistema modular permite automatizar los procesos de desmontaje, testeo y reconfiguración, reduciendo los tiempos de intervención y facilitando una logística urbana eficiente. Su diseño abierto asegura además la compatibilidad con futuras tecnologías de baterías (litio-azufre, sodio-ion, estado sólido), evitando la obsolescencia prematura del sistema.

Integración urbana: visión futura de la movilidad sostenible

La propuesta se alinea con una transformación más amplia en el modelo urbano, basada en el transporte compartido, la digitalización y el rediseño del espacio público. El crecimiento de servicios como carsharing, micromovilidad eléctrica y redes de bicicletas públicas está reduciendo el número de vehículos particulares en circulación, liberando espacio urbano y mejorando la eficiencia energética del sistema. En paralelo, el modelo de ciudad de 15 minutos —donde los servicios básicos están disponibles a pie o en micromovilidad— redefine las prioridades del urbanismo moderno.

En este contexto, la reutilización en cascada encaja de forma natural con las necesidades operativas de los nuevos sistemas de transporte. Las baterías de segunda vida alimentan flotas compartidas de alta rotación, cuyo mantenimiento y recarga se organizan desde hubs urbanos descentralizados. Gracias al diseño modular, estas baterías pueden ser sustituidas de forma automatizada o intercambiadas en puntos de recarga inteligentes, sin necesidad de intervención técnica compleja.

El despliegue progresivo de vehículos autónomos potenciará esta dinámica. Calles de sentido variable, señalética inteligente y circulación adaptativa requerirán baterías flexibles, compatibles y diagnosticables en tiempo real. Mientras los coches autónomos funcionen con baterías de primera vida, toda la infraestructura complementaria —desde scooters hasta semáforos y sensores urbanos— podrá operar con baterías de segunda o tercera vida.

En este nuevo ecosistema urbano, las baterías dejan de ser un componente aislado del vehículo para convertirse en nodos energéticos dinámicos. Su reutilización eficiente conecta movilidad, energía y planificación urbana en una infraestructura más resiliente, descentralizada y sostenible. Por tanto, el modelo propuesto no solo responde a una necesidad técnica, sino que constituye una pieza clave para el funcionamiento práctico de la ciudad del futuro.

4. Resultados

Viabilidad económica y escalabilidad

- **Viabilidad económica y escalabilidad**

Se ha desarrollado una modelización completa del sistema, incluyendo el diseño detallado de una planta industrial para reacondicionamiento de baterías. Este diseño contempla la superficie útil, la distribución de zonas (diagnóstico, reparación, almacenamiento, recarga y logística), los equipos necesarios, los recursos humanos asociados y el consumo energético total. También se han tenido en cuenta los flujos internos, la normativa vigente y los tiempos de operación, con el fin de optimizar la eficiencia operativa del proceso.

Los resultados económicos muestran una rentabilidad sólida:

- **CAPEX inicial:** 7,98 millones €
- **OPEX anual estimado:** entre 2,99 y 3,85 millones €
- **Ingresos acumulados en 6 años:** 30 millones €
- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** en torno al 14 %

Además de su rentabilidad, el modelo destaca por su escalabilidad. Gracias a la estandarización de módulos, protocolos abiertos de diagnóstico y procesos de reacondicionamiento, el sistema puede replicarse fácilmente en otras ciudades con características similares. Su integración con infraestructuras existentes —como estaciones de recarga, hubs logísticos urbanos o flotas públicas— minimiza los costes de implantación adicional. Esto lo convierte en una solución atractiva para entornos urbanos con alta densidad de vehículos eléctricos, programas de incentivos o demandas logísticas intensivas.

- **Reducción de emisiones y sostenibilidad ambiental**

La reutilización secuencial de baterías, en lugar de su reciclaje prematuro, permite reducir significativamente la huella ambiental del sistema. Los beneficios observados son:

- **Reducción de hasta un 40 % en emisiones de CO₂ por batería.**

- **Disminución de la demanda de materiales críticos** como litio, cobalto y níquel, reduciendo los impactos ambientales de su extracción.
- **Reducción de un 70 % en residuos eléctricos generados** respecto a un modelo lineal.
- **Mejora de la calidad del aire**, al fomentar la electrificación de vehículos ligeros y eliminar la necesidad de flotas contaminantes en entornos urbanos densos.
- **Disminución del ruido y la congestión**, al integrarse con flotas compartidas y sistemas de movilidad de última milla.

Estos beneficios son especialmente relevantes en ciudades que enfrentan problemas de contaminación, saturación del espacio urbano y transición hacia modelos energéticos más limpios.

- **Compatibilidad tecnológica y resiliencia futura**

El sistema ha sido diseñado desde una lógica modular y abierta, lo que garantiza su adaptación a futuras generaciones de baterías, entre las que destacan:

- **Baterías de estado sólido**, con mayor densidad y seguridad.
- **Tecnologías litio-azufre**, que prometen mayor ligereza y menor coste.
- **Baterías de ion-sodio**, abundantes, baratas y con menor impacto ambiental.

La clave de esta compatibilidad reside en mantener estándares comunes para encapsulado, diagnóstico y redistribución, lo que asegura la longevidad del sistema frente a la evolución tecnológica. De esta manera, el modelo no solo resuelve problemas actuales, sino que queda preparado para integrarse con innovaciones futuras sin requerir transformaciones estructurales costosas.

5. Conclusiones

Este trabajo desarrolla y valida un modelo de reutilización en cascada para baterías de vehículos eléctricos, demostrando su viabilidad como solución estratégica para la movilidad

sostenible en entornos urbanos. A través de una simulación computacional en Python, se ha modelizado el ciclo completo de una batería de **100 kWh**, distribuyendo su vida útil en tres etapas sucesivas: **vehículos eléctricos urbanos, micromovilidad ligera y almacenamiento estacionario**.

Las principales conclusiones son:

- **Extensión de la vida útil:** el modelo permite ampliar la vida útil total de cada batería de los **3-4 años** típicos en un uso intensivo a **más de 7 años**, gracias a su redistribución por niveles de exigencia.
- **Reducción de costes:** el análisis económico revela una **reducción del 35 % en el coste por kWh útil** entregado durante la vida total de la batería. Esta mejora se debe a la optimización del uso energético y al escalado de ingresos en diferentes fases del ciclo.
- **Viabilidad financiera:** con un **CAPEX estimado en 7,98 millones €** y un **OPEX anual entre 2,99 y 3,85 millones €**, el modelo genera **30 millones € de ingresos acumulados en 6 años**, alcanzando una **TIR del 14 %** bajo supuestos conservadores.
- **Impacto ambiental:** se evita la fabricación de baterías nuevas para las fases 2 y 3 del ciclo, lo que implica:
 - Ahorros de hasta un **40 % en emisiones de CO₂** por batería reutilizada.
 - **Reducción del 70 % en residuos eléctricos** asociados al fin de vida.
 - **Disminución significativa de la demanda de litio, cobalto y níquel**, especialmente relevante en contextos de tensión en las cadenas de suministro.
- **Eficiencia operativa y escalabilidad:** el sistema se ha diseñado con una **arquitectura modular tipo matrioska**, que permite:
 - Diagnóstico automático en hubs urbanos.
 - Intercambio rápido de módulos por tipo de vehículo.

- Compatibilidad entre diferentes generaciones y tecnologías (litio-ión, sodio-ion, litio-azufre).
- **Integración urbana:** el modelo se alinea con la transformación hacia ciudades más sostenibles. Su implementación es especialmente eficaz en zonas con alta densidad de flotas eléctricas, micromovilidad compartida y políticas de incentivo verde. En estos contextos, una única batería puede participar en **más de 3 modelos de uso distintos**, aumentando la eficiencia global del sistema.
- **Soporte a la ciudad inteligente:** se propone que los módulos degradados puedan alimentar también infraestructura urbana como semáforos inteligentes, hubs de recarga o sensores IoT, convirtiendo a cada batería en un nodo energético descentralizado y flexible.

Mirando al futuro, la sostenibilidad del modelo eléctrico no podrá sostenerse únicamente con avances tecnológicos, sino que exigirá un replanteamiento profundo de cómo concebimos el uso y la gestión de los recursos críticos. La escasez progresiva de litio y otros materiales estratégicos impone límites físicos que hacen inviable mantener un sistema basado en la producción constante de nuevas baterías. En este contexto, el desarrollo de soluciones de reutilización estructurada, como la reutilización en cascada, deja de ser una opción innovadora para convertirse en una pieza necesaria dentro de cualquier estrategia de transición energética realista. Al mismo tiempo, la transformación de los hábitos de movilidad —donde el vehículo privado tiende a ser reemplazado por modelos compartidos, conectados y urbanos— refuerza la necesidad de sistemas flexibles, modulares e interoperables que permitan intercambiar y redistribuir baterías según su estado. Lejos de ser un reto puramente técnico, esta reorganización implica una nueva manera de entender el ciclo de vida de la energía en la ciudad: más eficiente, más resiliente y más ajustada a los límites ecológicos y sociales del siglo XXI.

SUSTAINABLE SOLUTIONS FOR FUTURE MOBILITY

Author: Delgado Martín de Blas, Gonzalo

Supervisor: González González, Javier

Co-supervisor: Arbery Campos, Mario Esteban

Partner Institution: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

PROJECT SUMMARY

This Master's Thesis presents a circular model for electric battery management as a response to the urgent challenge of sustainable urban mobility. The proposal is based on the cascading reuse of batteries, extending their useful life through sequential use in electric vehicles, micromobility systems, and stationary energy storage.

This approach achieves up to a 40% reduction in CO₂ emissions per battery, a 70% decrease in electronic waste, and significantly reduces the demand for critical materials such as lithium, cobalt, and nickel. The system is supported by a modular “matryoshka-style” design and open protocols that allow for efficient diagnosis, reconditioning, and redistribution of battery cells according to their level of degradation.

The model has been validated through a computational simulation in Python, replicating the full technical and energy lifecycle of batteries. A detailed economic analysis forecasts a 14% Internal Rate of Return (IRR), with cumulative revenues of €30 million over 6 years, compared to an initial investment of €7.98 million.

The system also proves urban viability, integrating with 15-minute city models, micromobility logistics hubs, and autonomous transportation networks, where each shared scooter or bike can replace up to 12 private cars. Furthermore, the system is compatible with emerging battery technologies, such as solid-state, lithium-sulfur, or sodium-ion batteries, ensuring long-term scalability and technological resilience.

Altogether, this project offers a concrete, profitable, and scalable solution that combines engineering, economics, and urban planning to move toward truly sustainable mobility.

Keywords

Electric mobility, batteries, cascade reuse, circular economy, urban planning, simulation, sustainability

1. Introduction

Transport accounts for over **25% of global greenhouse gas emissions**, and in many European cities it is the main source of air pollution. While vehicle electrification is key to reducing emissions, the long-term sustainability of the model depends largely on the **management of batteries**, which are central to the new mobility paradigm.

The current system follows a **linear approach**, where batteries are recycled after automotive use—even when they retain significant residual capacity. This leads to high waste of critical materials like lithium and cobalt, unnecessary costs, and environmental pressure.

This Master's Thesis proposes a **circular solution based on cascading battery reuse**, extending the useful life of each unit to over **7 years** by reallocating them to less demanding uses such as micromobility or stationary storage. The model combines **modular design**, computational simulation, and economic analysis, demonstrating its **technical feasibility and profitability**, with a **14% IRR** and strong potential for **urban scalability**.

2. Project Definition

This project is structured around five complementary pillars that together assess the technical, economic, and urban viability of a circular battery management model:

- **Problem diagnosis:** the current battery market is analyzed, along with existing technologies and the environmental and economic externalities of the prevailing linear model—particularly the pressure on critical materials and electronic waste generation.
- **Technological solution design:** a **cascading reuse model** is developed, based on modular encapsulation and diagnostic protocols that redirect batteries to secondary applications according to their degradation level.
- **Economic and financial analysis:** cash flows, CAPEX/OPEX and revenues are modeled, yielding an **Internal Rate of Return (IRR) of 14%** over six years, for an initial investment of **€7.98 million**.
- **Environmental impact assessment:** the model estimates **up to 40% CO₂ emissions savings per battery**, a **70% reduction in e-waste**, and lower demand for lithium, cobalt, and nickel.
- **Urban integration and governance:** the system is evaluated in real-world settings, aligned with strategies for **micromobility**, **15-minute cities**, autonomous transport, and smart urban space management.

This multidisciplinary approach not only confirms the model's profitability but also outlines a feasible infrastructure that supports Europe's ongoing energy, urban, and digital transitions.

3. System Description

Circular Economy Design: Cascading Reuse of Batteries

This project proposes a circular battery management model based on cascading reuse, aiming to extend battery lifespan and maximize economic and environmental performance. Unlike the traditional linear approach—where batteries are discarded or recycled after their first use—the model introduces a phased reassignment system based on each unit's degradation level.

The battery begins its life in a high-rotation urban electric vehicle (e.g., carsharing), where it operates under demanding conditions requiring high autonomy and power. Once its useful capacity drops below a defined threshold—without compromising safety or performance—it is withdrawn, evaluated through predictive diagnostics, and reconditioned. This first transition allows the battery to be repurposed for a second life in micromobility vehicles such as scooters, bicycles, or electric kick scooters, where energy and power demands are significantly lower.

When the battery degrades further but still retains residual capacity, it enters a third phase: stationary energy storage systems. These include use in charging hubs, smart buildings, or solar installations, where the energy demand is minimal and performance requirements are modest. Here, the battery supports grid stability, absorbs renewable energy surpluses, or buffers peak demands without the need for high density or power output.

This cascading model extends the average battery life up to 7 years—compared to the typical 3–4 years in intensive urban use—while increasing total energy output across its lifetime. As a result, the cost per useful kilowatt-hour is reduced by approximately 35%, significantly improving the economic viability of electric mobility systems.

The model was validated through a computational simulation in Python, incorporating degradation curves, usage parameters, reconditioning costs, and redistribution logistics. The simulation calculates the levelized cost of energy (LCOE), projected revenues, emissions avoided, and efficiency ratios for each stage, all under conservative assumptions that allow the model to be scaled across various urban contexts.

To ensure operational feasibility, a modular "matryoshka" design was developed, using standardized, interchangeable battery cells. This architecture enables:

- Automated diagnostics at charging stations and during maintenance.
- Rapid module replacement depending on vehicle or application type.
- Compatibility across brands, generations, and future battery technologies.

This modular system supports automated disassembly, testing, and reconfiguration, reducing downtime and enabling a flexible, efficient urban logistics network. Its open design prevents early obsolescence and ensures adaptability to emerging chemistries such as lithium-sulfur, sodium-ion, or solid-state batteries.

Urban Integration: A Strategic Vision for Future Mobility

This proposal aligns with a broader transformation of urban mobility, driven by shared transportation, digitalization, and the redesign of public space. The expansion of carsharing, micromobility services, and public bike networks is already reducing the number of private vehicles on the road, freeing up urban space, and improving system-wide energy efficiency. At the same time, the “15-minute city” model—where essential services are accessible by foot or light transport—offers a new urban paradigm.

In this scenario, cascading battery reuse fits seamlessly into the operational needs of electric micromobility. Second-life batteries power shared fleets with high turnover, maintained and recharged via decentralized urban hubs. Thanks to their modular design, batteries can be swapped automatically or replaced at smart charging points, reducing the need for complex technical interventions.

The progressive rollout of autonomous vehicles will further reinforce this dynamic. Variable-direction streets, intelligent signage, and adaptive traffic flows will require batteries that are flexible, compatible, and diagnosable in real time. While autonomous cars will rely on first-life battery modules, the supporting ecosystem—scooters, sensors, infrastructure—can run on second- or third-life batteries.

In this new urban ecosystem, batteries are no longer just a component of a vehicle. They become dynamic energy nodes connecting transport, infrastructure, and public services in a decentralized, intelligent, and low-carbon system. The proposed model is not merely a technical solution—it is a foundational piece for the practical functioning of tomorrow’s cities.

4. Results

Economic viability and scalability

Detailed estimates and technical calculations were carried out at this stage, including full layout of the industrial facility: usable area, distribution of work zones, storage and testing, necessary equipment, charging systems, logistics platforms, associated human resources, and energy consumption. Internal flows, applicable regulations, and operation times were also assessed to ensure production efficiency.

The proposed model demonstrates significant profitability:

- Initial CAPEX: €7.98 million
- Annual OPEX: between €2.99M and €3.85M
- Accumulated revenues over 6 years: €30 million
- IRR: around 14%

Its scalability is particularly favorable in cities with high EV density, green incentive policies, or intense logistics needs. Battery module standardization, combined with a shared testing, reconditioning, and redistribution protocol, facilitates replication in various urban contexts with reduced implementation costs. Additionally, the system is designed for integration with existing infrastructure—charging stations, urban distribution centers, municipal fleets—enabling territorial expansion without major additional investments.

Emissions reduction and urban pollution

Battery reuse avoids the need to produce new units, resulting in:

- Up to 40% CO₂ emissions savings per battery
- Lower demand for lithium, cobalt, and nickel
- 70% reduction in electronic waste
- Improved air quality in densely populated areas

- Moreover, by promoting micromobility electrification and local energy storage, it also reduces noise, congestion, and urban heat stress.

Compatibility with future technologies

The system is designed to be compatible with:

- Solid-state batteries (denser and safer)
- Lithium-sulfur (lighter and cheaper)
- Sodium-ion (less polluting and more abundant)

The key is maintaining open protocols for encapsulation, diagnostics, and allocation.

This ensures the system remains relevant and benefits from technological progress.

5. Conclusions

This project offers a strategic solution to the sustainability challenge of electric mobility. Its main conclusions are:

- Circular battery management is not only possible but profitable and scalable.
- Modular design and advanced simulation are key to viability.
- Implementation can significantly reduce emissions and raw material pressure.
- It is compatible with urban redesign and policies for shared, autonomous, low-impact mobility.

Recommended next steps:

1. Implement pilots in cities with shared electric fleets.
2. Establish public-private consortia for testing infrastructure.
3. Develop regulations that prioritize reuse over immediate recycling.
4. Integrate this model into smart city strategies and climate action plans.

5. Install battery health check and recharging stations in mobility hubs to help companies optimize vehicle charging—one of the highest costs in vehicle rental operations.

The future of mobility is not only about what vehicles we use, but how we design, operate, and recover them. This work demonstrates that sustainability is not just a goal—it is an architecture to be built with technical intelligence, systemic vision, and institutional commitment.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción	4
Capítulo 2. La Urgencia de la Transición Ecológica: Un Reto Global para la Movilidad	5
Descarbonización del transporte	7
Alineación con los ODS.....	11
Capítulo 1. Soluciones sostenibles para la movilidad	14
Contexto de la movilidad sostenible	14
1.1.1 Diseño del entorno	15
Estrategias técnicas para reducir la contaminación del transporte privado y público.....	19
1.1.2 Transporte privado: Optimización mediante tecnologías avanzadas	19
1.1.3 Infraestructuras inteligentes para transporte público sostenible.....	27
1.1.4 Movilidad compartida	29
1.1.5 Hubs de movilidad.....	33
1.1.6 Movilidad vertical aerotaxis como solución de transporte	34
1.1.7 eficiencia de los motores	38
El papel de las baterías en la movilidad sostenible.....	40
1.1.8 Baterías como tecnología clave.....	40
1.1.9 Ventajas frente a otras opciones	41
1.1.10 Impacto ambiental de las baterías.....	41
1.1.11 Electrificación del transporte.....	42
Sistemas de carga eléctrica	43
Capítulo 2. Evaluación de Combustibles para la Movilidad.....	46
2.1.1 Combustibles fósiles: Limitaciones y retos ambientales	48
2.1.2 Gas natural comprimido (GNC): Opciones de transición	50
2.1.3 Biocombustibles: Viabilidad y sostenibilidad	51
2.1.4 Hidrógeno verde: Potencial y desafíos	52
Comparación de combustibles	54

Capítulo 3. Por qué baterías.....	57
Un mercado en aumento	57
¿Qué reclama la demanda? (necesidades eléctricas de la movilidad).....	61
3.1.1 Transporte Terrestre: Necesidades Específicas de Batería para Vehículos Eléctricos .	61
3.1.2 Aviación Eléctrica: Desafíos y Avances en las Necesidades de Baterías	67
Demanda de las baterías por sector.....	70
4.2 Tecnologías Actuales en Sistemas de Almacenamiento de Energía.....	72
Capítulo 4. Cadena de suministro de las baterías	81
De la mina al mercado (Litio).....	81
Importancia del Litio.....	82
4.1.1 Posicionamiento de los países.....	85
4.1.2 Evolución de litio.....	88
Problemas de la cadena de suministro	92
Capítulo 5. Selección Óptima de Baterías: Factores Clave para Cada Segmento.....	99
Descarte de los tipos de batería con una menor esperanza de vida.....	99
Sistema de selección de baterías para los principales usos de la movilidad	102
5.1.1 Introducción y alcance	102
5.1.2 Cálculo de la puntuación final	104
Capítulo 6. Modelo de economía circular.....	107
Como puede ayudar la economía circular	107
Estructura analítica del modelo y metodología de cálculo.....	108
6.1.1 Bloques de análisis y cálculos a desarrollar.....	109
definición del modelo de degradación	111
6.1.2 Modelo de degradación y reutilización en cascada	111
6.1.3 Resultados del modelo de simulación de degradación funcional (Python).....	117
6.1.4 Modelo económico y evaluación de rentabilidad del sistema circular	118
6.1.5 Método de conexión de las baterías al coche y los distintos vehículos y su funcionamiento	120
6.1.6 Información de partida del modelo	126
6.1.7 restricciones	129
6.1.8 Análisis de la rentabilidad del proceso	129
6.1.9 síntesis final de los resultados económico-financieros	141

6.1.10 análisis de los resultados.....	146
6.1.1 Rentabilidad económica	150
Capítulo 7. La batería del futuro.....	151
Las baterías de estado sólido:	151
Las baterías de Litio Azufre.....	151
Las baterías de ion sodio.....	152
Las tecnología de las baterías no es la única solución	152
Capítulo 8. Referencias	155

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Desde los albores de la humanidad, el impulso por movernos ha sido más que una necesidad funcional: ha sido una expresión de nuestra naturaleza. No nos desplazamos solo para satisfacer demandas básicas; también lo hacemos por curiosidad, por deseo de conexión, por la necesidad de descubrir. Esta pulsión por la movilidad ha modelado nuestras sociedades, nuestros entornos y nuestra tecnología, convirtiéndose en un eje de transformación y progreso.

Hoy, en plena transición hacia modelos urbanos más eficientes, como la ciudad de los quince minutos, nos enfrentamos a una paradoja: aunque todo parece estar más cerca, los desplazamientos aumentan. ¿Será que el ser humano no solo busca llegar, sino también moverse? Este interrogante nos lleva a considerar la movilidad no como un problema a resolver, sino como una realidad a reconfigurar.

Sin embargo, este derecho o necesidad de movimiento se encuentra en tensión con los límites ecológicos del planeta. La sostenibilidad emerge entonces como el nuevo marco desde el cual pensar la movilidad. En este cruce de caminos, la descarbonización no es solo un objetivo ambiental, sino un cambio estructural que redefine la forma en que nos desplazamos, producimos y consumimos energía.

En este escenario, las baterías se posicionan como un componente estratégico: su desarrollo y gestión determinarán la viabilidad de un modelo de movilidad sostenible. Por ello, este trabajo se propone analizar las oportunidades y desafíos que plantea el uso de baterías en el transporte del futuro, evaluando su diseño, eficiencia, capacidad de integración con energías renovables y potencial de circularidad. El objetivo es ofrecer una visión integral que combine viabilidad técnica, responsabilidad ambiental y resiliencia económica.

Capítulo 2. LA URGENCIA DE LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA: UN RETO GLOBAL PARA LA MOVILIDAD

La movilidad, responsable de casi una cuarta parte de las emisiones globales de dióxido de carbono, refleja un sistema que desafía los límites del planeta. Mantener este curso nos lleva hacia un horizonte marcado por temperaturas en ascenso, fenómenos meteorológicos extremos, mares que reclaman más tierras, ecosistemas que se desvanecen y un impacto innegable en la salud de las personas. Este no es el camino que debemos seguir; cambiarlo es necesario, urgente y posible.

La descarbonización es un objetivo global fundamental para mitigar el cambio climático y promover un desarrollo sostenible. Organismos internacionales como la Comisión Europea y el Banco Mundial han establecido metas claras en este sentido. La Comisión Europea, a través del Pacto Verde Europeo, se ha comprometido a alcanzar la neutralidad climática para 2050, lo que implica una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este pacto tiene como objetivo transformar la economía europea para que sea más sostenible, integrando energías renovables, eficiencia energética y movilidad limpia. Por su parte, el Banco Mundial enfatiza la necesidad de una descarbonización agresiva, impulsada por transformaciones fundamentales en los sistemas energéticos, urbanos, industriales y alimentarios mundiales, con el fin de limitar el calentamiento global a 1,5 grados Celsius y evitar los peores efectos del cambio climático.

En este contexto, las baterías desempeñan un papel crucial en la transición hacia una economía baja en carbono. La creciente demanda de soluciones de almacenamiento de energía renovable y la electrificación de sectores como el transporte y la industria han impulsado un mercado de baterías en expansión. Este crecimiento, impulsado por el aumento de la adopción de vehículos eléctricos, el despliegue de energía solar y eólica, y la necesidad de sistemas de almacenamiento

de energía más eficientes. El mercado de baterías ha experimentado una aceleración sin precedentes en los últimos años, y se espera que esta tendencia continúe con la expansión de la infraestructura eléctrica y la adopción masiva de tecnologías limpias. Se estima que el valor del mercado global de baterías para almacenamiento de energía crecerá a una tasa compuesta anual del 20% hasta 2030 [1].

Como señala Michael Porter, “el propósito de la empresa debe redefinirse como la creación de valor compartido, no únicamente la obtención de beneficios”. En este sentido, las políticas impulsadas por la Unión Europea han orientado ese valor compartido hacia objetivos ambientales concretos, como la promoción de una movilidad limpia. Cuando las regulaciones públicas se alinean con las expectativas sociales, sectores estratégicos como el de la movilidad sostenible pueden beneficiarse de un fuerte respaldo institucional y social, generando un entorno favorable para su expansión.

Sin embargo, este crecimiento presenta desafíos significativos en términos de cadenas de suministro y disponibilidad de materiales críticos, como el litio, cobalto y níquel. La extracción de estos materiales plantea preocupaciones sobre su sostenibilidad, su impacto ambiental y los derechos laborales en los países donde se explotan. A medida que la demanda de baterías aumenta, se hace más difícil satisfacer las necesidades del mercado sin comprometer los estándares éticos y ambientales.

En resumen, las baterías son una pieza clave en la transición hacia una economía descarbonizada. Su desarrollo y despliegue efectivos son esenciales para alcanzar los objetivos climáticos globales y construir un futuro sostenible. La innovación en el diseño de baterías y la mejora de sus características será determinante en el éxito de esta transición hacia un modelo energético más limpio y eficiente.

DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE

El transporte, responsable de aproximadamente el 25% de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con la energía. Se encuentra en el centro de los esfuerzos internacionales para mitigar el cambio climático. Estas emisiones, derivadas principalmente del consumo de combustibles fósiles, no solo afectan al medio ambiente, sino que también agravan los problemas de salud pública y congestionan las ciudades. En respuesta, gobiernos y organismos internacionales, como la Unión Europea (UE), han implementado medidas ambiciosas destinadas a descarbonizar el transporte, promoviendo alternativas más sostenibles y alineadas con los objetivos de neutralidad en carbono establecidos por el Acuerdo de París.

Entre estas medidas destacan las **Zonas de Bajas Emisiones (ZBE)**, que limitan el acceso a vehículos altamente contaminantes en áreas urbanas, fomentando el uso de transportes limpios y mejorando la calidad del aire. Paralelamente, la UE impulsa la **electrificación del transporte público**, promoviendo la incorporación de autobuses eléctricos y desarrollando infraestructuras para facilitar su operación. A nivel fiscal, estrategias como la **fiscalidad verde**, mediante impuestos a los carburantes fósiles y sistemas de tarificación vial, buscan desincentivar el uso de vehículos contaminantes y financiar tecnologías más limpias. Según el **Foro Internacional de Transporte (ITF)**, intensificar las políticas de descarbonización podría reducir las emisiones del transporte terrestre hasta un 80% para 2050, limitando el calentamiento global por debajo de los 2 °C [1].

El sector del transporte de mercancías también es objeto de transformación. La consolidación de **redes logísticas optimizadas** y el uso de combustibles alternativos, como el hidrógeno verde y los biocombustibles avanzados, están sentando las bases de una movilidad más eficiente y sostenible. Programas como **ReFuelEU Aviation**, que promueven combustibles sostenibles para la aviación, y la creación de puntos de recarga para vehículos eléctricos e infraestructura de hidrógeno son ejemplos de iniciativas que subrayan el compromiso de la UE con una transición estructural hacia modelos de transporte limpio. Un estudio de **Nature Climate Change** refuerza

que la descarbonización total del transporte en la Unión Europea podría evitar hasta 2°C de aumento en las temperaturas globales, siempre que se integre con la adopción de energías renovables en otros sectores clave [2].

No obstante, el reto no se limita a la transformación tecnológica. Es imprescindible repensar el diseño urbano y las dinámicas de movilidad cotidiana para minimizar los desplazamientos innecesarios. Un enfoque clave es el concepto de las **ciudades de los 15 minutos**, donde las personas pueden acceder a servicios básicos como tiendas, escuelas, y centros de salud en un radio de 15 minutos caminando o en bicicleta. Este modelo no solo reduce la dependencia de los vehículos motorizados, sino que mejora la calidad de vida al disminuir la congestión, los tiempos de viaje y las emisiones de CO₂. En el caso de España, el **Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana** estima que transformar el transporte de mercancías podría reducir las emisiones entre un 80% y un 95% para 2050, contribuyendo significativamente a los compromisos de neutralidad climática [3].

Cuando los desplazamientos son inevitables, la mejor solución es que los bienes y servicios se muevan hacia las personas en lugar de que estas tengan que desplazarse hacia ellos. Esto requiere la implementación de **logística eficiente y compartida**, capaz de consolidar entregas en una misma área mediante vehículos eléctricos o de bajas emisiones. Este enfoque, ampliamente adoptado por empresas de logística avanzada, optimiza las rutas de entrega y reduce drásticamente las emisiones de la "última milla". Las entregas realizadas con bicicletas eléctricas o vehículos ligeros compartidos son un ejemplo de soluciones sostenibles y viables que complementan este modelo.

Cuando el desplazamiento físico de personas no puede evitarse, la opción más sostenible es utilizar transporte en el que las emisiones por pasajero sean mínimas. Esto puede lograrse mediante el **transporte público electrificado**, como autobuses y trenes eléctricos, que ofrecen una opción eficiente y de bajas emisiones, especialmente en áreas urbanas densas. Alternativas como los sistemas de **carpooling** y servicios de **ride-sharing** optimizan el uso de vehículos

privados al compartir trayectos entre varios pasajeros, reduciendo las emisiones por persona. Además, para distancias cortas, los **vehículos compartidos** como bicicletas y scooters eléctricos representan opciones accesibles y sostenibles que contribuyen a descongestionar las ciudades y mejorar la calidad del aire.

La descarbonización del transporte no es únicamente una necesidad técnica, sino una oportunidad estratégica para redefinir las ciudades y las economías en torno a un modelo más sostenible, resiliente e innovador. Minimizar el movimiento innecesario, optimizar las redes logísticas y fomentar el uso de tecnologías verdes deben ser los pilares centrales de este cambio. Estas estrategias no solo reducirán significativamente las emisiones de GEI, sino que también transformarán las ciudades en entornos más saludables, habitables y dinámicos, alineando el progreso humano con las necesidades del planeta y de las generaciones futuras.

Sabemos que el transporte no es el único emisor de GEI, y hay muchas industrias lejos de lograr los objetivos propuestos de la descarbonización veamos la inversión esperada en cada una de las industrias para alcanzar el objetivo de 1,5°C.

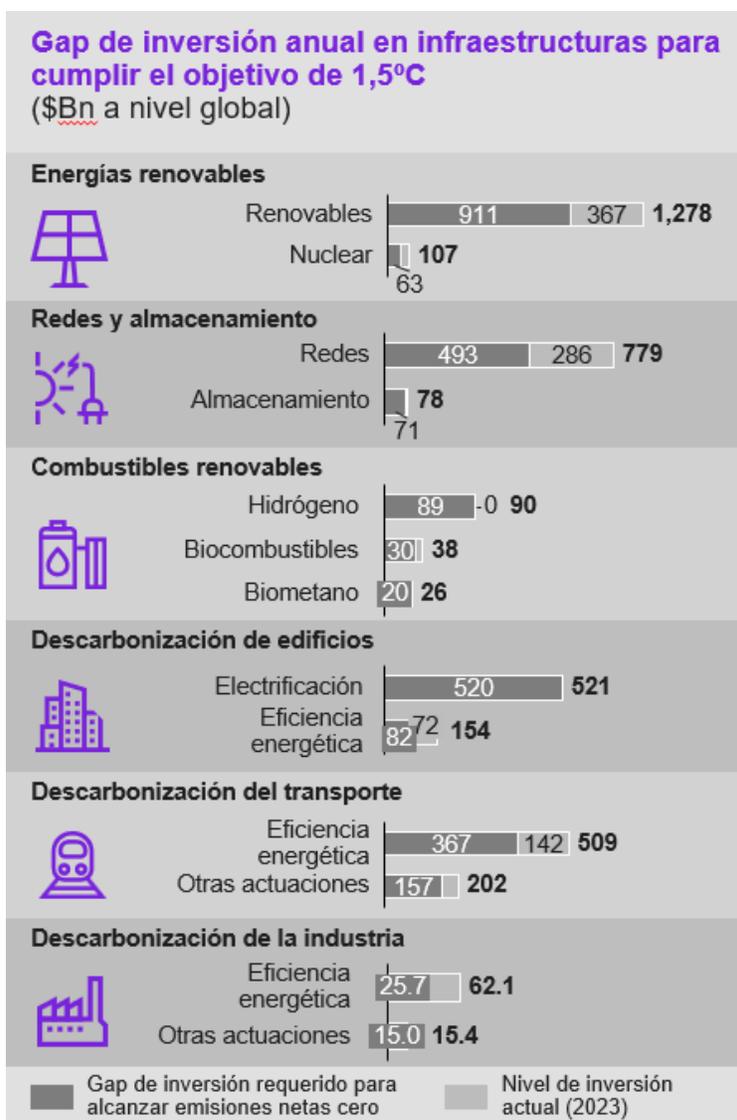


Ilustración 1/Gap de inversión para alcanzar emisiones cero; fuente:Kearney

La reducción de CO₂ requiere una inversión estratégica en energías renovables, electrificación y eficiencia energética. La transición energética dependerá de expandir las renovables y modernizar redes eléctricas para garantizar estabilidad. El transporte debe electrificarse con infraestructura de carga, movilidad compartida y optimización logística. La industria y la edificación deben adoptar tecnologías eficientes, con electrificación, aislamiento térmico y sistemas inteligentes. El hidrógeno verde y los biocombustibles serán clave en sectores difíciles de electrificar. La

eficiencia energética es la solución más rentable a corto plazo. La combinación de incentivos, financiamiento privado e innovación acelerará la descarbonización global.

ALINEACIÓN CON LOS ODS

El presente trabajo se enmarca dentro de la Agenda 2030 y contribuye de manera directa a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El análisis de tecnologías de baterías, junto con el modelo de reutilización en cascada planteado, conecta tanto con los objetivos energéticos y ambientales como con la innovación industrial y la transición hacia una economía más circular. A continuación, se detallan los principales ODS a los que se alinea este proyecto:

Parte II ODS 7: Energía asequible y no contaminante

El desarrollo de soluciones de almacenamiento energético mediante baterías resulta clave para la integración de energías renovables intermitentes, como la solar y la eólica. En este contexto, el proyecto fomenta una electrificación más limpia y eficiente, que reduce la dependencia de fuentes fósiles y garantiza un suministro estable de electricidad.

La propuesta de reutilizar baterías en aplicaciones de menor exigencia (por ejemplo, su segunda vida en motocicletas, bicicletas o almacenamiento estacionario) permite abaratar costes y ampliar el acceso a tecnologías de almacenamiento en sectores y regiones donde el coste de nuevas baterías podría ser prohibitivo. De este modo, se facilita una transición energética más inclusiva y asequible, contribuyendo a democratizar el acceso a energías limpias.

Parte III ODS 9: Industria, innovación e infraestructuras

El impulso de la electrificación requiere una infraestructura sólida de almacenamiento energético y transporte eléctrico. Este trabajo contribuye al ODS 9 al analizar y promover tecnologías innovadoras de baterías, tanto en el ámbito químico (ión-litio, estado sólido, sodio-ión, etc.) como en los modelos de reutilización y reciclaje.

La propuesta de un modelo de economía circular que redistribuye las baterías a lo largo de

distintas aplicaciones no solo reduce el impacto ambiental, sino que también impulsa la creación de cadenas de valor industriales más resilientes y sostenibles. De esta manera, se fomenta la innovación tecnológica y se refuerza la infraestructura necesaria para un sistema energético electrificado y bajo en carbono.

Parte IV ODS 12: Producción y consumo responsables

La producción masiva de baterías plantea importantes retos en cuanto al uso de materiales críticos como el litio, el cobalto y el níquel. Este proyecto aborda directamente estas problemáticas mediante la propuesta de reutilizar y reciclar las baterías, optimizando su ciclo de vida y reduciendo la necesidad de nuevas extracciones. El modelo de reutilización en cascada permite extender la vida útil de las celdas, adaptándolas a aplicaciones de menor demanda energética, lo que disminuye la generación de residuos peligrosos y promueve un consumo más responsable. Asimismo, la incorporación de estrategias de estandarización de celdas y de gestión inteligente mediante herramientas digitales facilita la trazabilidad y la eficiencia en la gestión de recursos, en línea con los principios de producción circular.

Parte V ODS 13: Acción por el clima

La lucha contra el cambio climático requiere una reducción drástica de las emisiones de gases de efecto invernadero, y las baterías desempeñan un papel fundamental en este objetivo. Al facilitar la electrificación de sectores como el transporte y al integrar energías renovables en la red, contribuyen a desplazar progresivamente los combustibles fósiles. El proyecto refuerza este ODS al evaluar estrategias que disminuyen la huella ambiental asociada a la producción y al desecho de baterías. La reutilización en cascada y el reciclaje final de materiales críticos reducen las emisiones vinculadas a la fabricación de nuevas unidades, mientras que la optimización de los flujos de uso aumenta la eficiencia global del sistema energético. De este modo, se contribuye tanto a mitigar el cambio climático como a generar beneficios económicos y ambientales que fortalecen la resiliencia de la sociedad frente a este desafío.

Capítulo 1. SOLUCIONES SOSTENIBLES PARA LA MOVILIDAD

CONTEXTO DE LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

La movilidad responde a una necesidad esencial, y hacer que estas necesidades sean sostenibles exige soluciones que minimicen la huella de carbono.

Los motivos de desplazamiento pueden agruparse en seis categorías principales: trabajo, salud, educación, compras, deporte y ocio. Nos movemos para obtener bienes, conectarnos con personas o experiencias; siempre hay una razón detrás. Sin embargo, muchas de estas necesidades podrían satisfacerse de manera más eficiente y menos contaminante. Como dice el refrán: "Si Mahoma no va a la montaña, la montaña irá a Mahoma". En este contexto, la solución más sostenible sería que Mahoma viviera cerca de la montaña.

El concepto de la ciudad de los 15 minutos ejemplifica esta idea. Esta propuesta urbanística busca organizar las ciudades para que servicios esenciales como atención médica, educación, ocio y compras estén a menos de 15 minutos andando o en bicicleta de cualquier vivienda. Esto no solo reduce la necesidad de transporte, sino que también mejora la calidad de vida al fomentar comunidades más compactas y conectadas. Es un modelo que ya se aplica exitosamente cuando múltiples necesidades, por ejemplo, en zonas urbanas comerciales, se cubren en un único lugar por conveniencia. Evitar el transporte siempre será la forma más pura y efectiva de movilidad sostenible. Los trayectos de cualquier ciudad comienzan y terminan todos de una misma manera, andando. Por ello una buena ciudad adaptada a la movilidad debe tener un espacio para el peatón y fomentar el transporte a pie.

Sin embargo, cuando no es posible acercar todos los servicios al ciudadano, el combustible que utiliza el transporte se convierte en el segundo factor más importante. Para que el transporte sea verdaderamente sostenible, los vehículos deben funcionar con combustibles verdes, renovables y

libres de gases de efecto invernadero. La electricidad generada por fuentes como la solar, la eólica o la hidráulica es una de las opciones más prometedoras. Estos combustibles no solo reducen las emisiones, sino que también minimizan los impactos ambientales asociados con la extracción de recursos fósiles. Adoptar estas tecnologías es esencial para avanzar hacia un transporte limpio y responsable.

En resumen, la sostenibilidad en la movilidad comienza con reducir la necesidad de transporte mediante planificación urbana inteligente. Cuando el transporte es inevitable, los combustibles renovables y libres de emisiones son la mejor opción. Y finalmente, si ninguna de estas alternativas es viable, optar por motores altamente eficientes puede marcar la diferencia. Los motores eléctricos, gracias a su eficiencia excepcional, su integración con energías renovables, su bajo impacto ambiental y sus beneficios prácticos, se consolidan como el pilar de un futuro de movilidad verdaderamente sostenible

1.1.1 DISEÑO DEL ENTORNO

El diseño del entorno urbano constituye uno de los factores más determinantes en la eficiencia de la movilidad. Una planificación deficiente puede generar cuellos de botella estructurales que imposibiliten reducir, por debajo de ciertos umbrales críticos, los tiempos de desplazamiento entre áreas funcionales clave de la ciudad. Aunque existen soluciones técnicas como túneles o pasos elevados que permiten sortear estas barreras, su implementación masiva resulta inviable tanto desde el punto de vista económico como urbanístico, especialmente cuando los errores de diseño se repiten sistemáticamente en múltiples sectores del tejido urbano.

En este contexto, la planificación urbana estratégica se consolida como una herramienta esencial para afrontar los retos asociados al crecimiento descontrolado de las ciudades y a la excesiva dependencia del transporte motorizado privado. Un diseño urbano que priorice la accesibilidad, la conectividad jerárquica entre nodos urbanos y la integración eficiente de modos de transporte diversos —como el transporte público, la micromovilidad y los desplazamientos peatonales—

ofrece una alternativa estructural y rentable para reducir de forma significativa la necesidad de desplazamientos largos, optimizando el rendimiento del sistema de movilidad en su conjunto.

1.1.1.1 La Ciudad de los 15 minutos

El concepto de la "Ciudad de los 15 minutos", busca garantizar que todos los servicios esenciales (salud, educación, comercio, empleo y ocio) se encuentren accesibles en un radio máximo de quince minutos, ya sea caminando, en bicicleta o mediante transporte público. Este modelo requiere analizar técnicamente elementos como la densidad urbana, la diversidad de usos del suelo y la accesibilidad real a servicios esenciales. Herramientas avanzadas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten evaluar detalladamente la accesibilidad mediante análisis de redes y modelos específicos como los modelos de gravedad o el modelo de Hansen. Estas herramientas facilitan la identificación de áreas prioritarias para intervenciones urbanísticas, optimizando así los recursos disponibles para mejorar la calidad urbana.

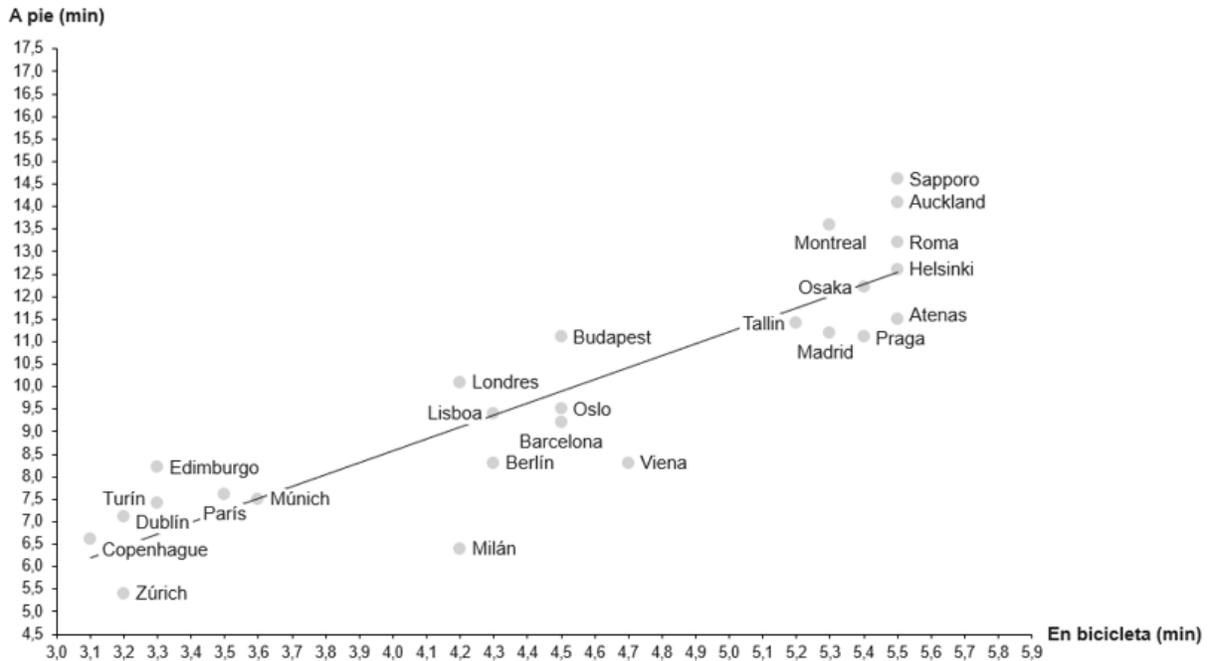


Ilustración 2/distancia por ciudad a servicios básicos

1.1.1.2 Densidad urbana y diversidad de usos

Un aspecto crítico en el diseño urbano es la densidad y la diversidad funcional. Las áreas urbanas con una alta concentración de usos residenciales, comerciales y laborales reducen significativamente la necesidad de desplazamientos largos. Técnicamente, esto implica la aplicación de índices específicos, como el índice de diversidad de Shannon, que evalúan cómo de mezclados están los diferentes usos del suelo en una determinada área. Estas mediciones permiten identificar zonas urbanas que requieren mejoras en su planificación para alcanzar un modelo de ciudad compacta eficiente.

1.1.1.3 Evaluación del impacto ambiental y energético

Evaluar los impactos ambientales y energéticos de diferentes propuestas urbanísticas es esencial para garantizar la sostenibilidad integral de las intervenciones. Técnicas avanzadas como las

simulaciones energéticas y los análisis de ciclo de vida (ACV) permiten evaluar rigurosamente estos impactos. En particular, el último capítulo de este trabajo presenta un modelo técnico específico diseñado para analizar las emisiones, los ciclos de vida y realizar simulaciones energéticas centradas en las baterías de vehículos eléctricos. Este modelo ayuda a cuantificar con precisión los beneficios ambientales derivados de diversas configuraciones urbanas y alternativas de movilidad eléctrica.

1.1.1.4 Simulación avanzada de escenarios de movilidad

Finalmente, el uso de herramientas avanzadas de simulación como VISUM, TransCAD o VISSIM permite anticipar y validar los beneficios técnicos, ambientales y económicos de diferentes escenarios de movilidad. Estas herramientas facilitan la comparación precisa entre múltiples alternativas y ayudan a seleccionar aquellas que presentan la mayor eficiencia y rentabilidad desde un enfoque técnico y económico, respaldando así una planificación urbana verdaderamente sostenible

1.1.1.5 Hubs de movilidad como nodos integradores

Un **hub de movilidad** es una infraestructura física y digital que actúa como punto de conexión entre múltiples modos de transporte como transporte público, micro movilidad, vehículos compartidos y peatonalizacion, permitiendo transbordos eficientes y una gestión integrada de la movilidad urbana.

Los hubs de movilidad han evolucionado hacia elementos estructurales de una red urbana altamente eficiente y descentralizada. Su relevancia actual no reside tanto en la mera intermodalidad, ya consolidada, sino en su capacidad para operar como nodos inteligentes dentro de mallas policéntricas, reduciendo la necesidad de desplazamientos a grandes distancias y promoviendo una movilidad localizada y optimizada.

El valor añadido de estos hubs radica en la integración digital de los servicios: sistemas de gestión en tiempo real, análisis predictivos de demanda, provisión energética distribuida y

conectividad con redes de micro movilidad y movilidad compartida. Esta convergencia tecnológica permite no solo una mejor asignación de recursos de transporte, sino también una reducción efectiva de emisiones por usuario-kilómetro, gracias a trayectos más directos, menores tiempos de espera y mayor ocupación media de los vehículos.

El enfoque técnico actual prioriza su distribución estratégica en entornos de alta densidad residencial o funcional, en línea con el modelo de ciudad de 15 minutos. En estos contextos, cada hub actúa como nodo de proximidad, conectando a los ciudadanos con los principales ejes de movilidad urbana y absorbiendo parte de la presión sobre las infraestructuras centrales. La eficiencia del sistema depende tanto de su diseño físico como de su arquitectura digital, incluyendo interoperabilidad de plataformas, integración tarifaria y acceso universal.

ESTRATEGIAS TÉCNICAS PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN DEL TRANSPORTE PRIVADO Y PÚBLICO

Estas son las medidas que más avances están realizando en la movilidad de las ciudades, las nuevas zonas se construyen bajo los parámetros que hemos comentado antes, pero en ciudades ya construidas, estas medidas son imprescindibles para relajar la congestión urbana.

1.1.2 TRANSPORTE PRIVADO: OPTIMIZACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS AVANZADAS

El transporte privado, principalmente coches y motos, es uno de los principales responsables de la contaminación urbana. Para reducir significativamente sus emisiones, resulta esencial implementar tecnologías avanzadas para optimizar el flujo vehicular. Las bases de datos en tiempo real permiten monitorizar y gestionar dinámicamente el tráfico, redirigiendo vehículos hacia vías menos congestionadas antes de que se alcance la capacidad máxima. Además, la sincronización inteligente de semáforos mediante algoritmos predictivos, alimentados por datos

históricos y condiciones en tiempo real, minimiza frenadas y aceleraciones innecesarias, reduciendo así considerablemente las emisiones.

La incorporación de sensores integrados en infraestructuras urbanas (cámaras de tráfico, sensores de pavimento, drones y farolas inteligentes) proporciona información precisa y constante sobre patrones de circulación, densidad vehicular y velocidad. A su vez, aplicaciones móviles como Waze o Google Maps, que recopilan y analizan datos en tiempo real, ofrecen rutas optimizadas a los usuarios, reduciendo significativamente las emisiones totales por vehículo.

1.1.2.1 Infraestructuras inteligentes para transporte público sostenible

La electrificación del transporte público, principalmente mediante autobuses eléctricos e híbridos, es una estrategia técnica clave para eliminar localmente las emisiones contaminantes. Esta renovación tecnológica debe complementarse con la modernización y ampliación de redes ferroviarias eléctricas, utilizando técnicas como el frenado regenerativo para aumentar significativamente la eficiencia energética general del sistema.

Asimismo, la integración tecnológica en la gestión del transporte público mediante inteligencia artificial permite optimizar rutas y frecuencias en tiempo real, mejorando considerablemente la eficiencia operativa y reduciendo emisiones por pasajero. Plataformas digitales multimodales que combinan transporte público con opciones compartidas refuerzan aún más la sostenibilidad del sistema urbano.

1.1.2.2 Electrificación avanzada del transporte

Una infraestructura avanzada de carga rápida y ultrarrápida es crucial para facilitar la adopción masiva de vehículos eléctricos. La investigación y desarrollo en baterías de estado sólido y otras tecnologías emergentes también permiten mejorar considerablemente la autonomía, reduciendo tiempos de recarga y facilitando una adopción más amplia.

El concepto técnico de Vehicle-to-Grid (V2G), donde los vehículos eléctricos actúan como unidades móviles de almacenamiento energético, es esencial para estabilizar y equilibrar redes eléctricas. Esta integración facilita la incorporación de energías renovables, optimizando la gestión energética y disminuyendo la dependencia de centrales eléctricas adicionales.

1.1.2.3 El papel clave de las baterías en la movilidad sostenible

Las baterías son un elemento central para la movilidad sostenible, debido principalmente a la eficiencia excepcional de los motores eléctricos. Históricamente, la eficiencia de los motores ha evolucionado significativamente. Desde las máquinas de vapor con eficiencias del 5-10%, pasando por motores de combustión interna con rendimientos entre el 25-40%, hasta llegar al motor eléctrico moderno que logra eficiencias energéticas del 80-95%.

Los motores eléctricos destacan claramente no solo por su rendimiento energético superior, sino también por una serie de ventajas adicionales: eficiencia energética sobresaliente, cero emisiones locales, simplicidad mecánica, integración con energías renovables, recuperación energética mediante frenado regenerativo, reducción del ruido y flexibilidad en diseño.

Esta capacidad técnica única hace que los motores eléctricos sean indudablemente la opción más eficiente y sostenible para el futuro del transporte urbano.

1.1.2.4 Vehículos autónomos: Una solución técnica para el futuro

Los vehículos autónomos, equipados con sensores de alta precisión (LIDAR, radares, cámaras), ofrecen una solución integral a los retos del transporte urbano moderno. Utilizando los motores eléctricos más eficientes disponibles, estos vehículos pueden reducir significativamente accidentes gracias a su precisión en la conducción y rápida capacidad de reacción. Además, optimizan la conducción reduciendo costes operativos y minimizando la contaminación mediante la eliminación de frenadas innecesarias y estabilizando la velocidad promedio de circulación.

Los vehículos autónomos son especialmente apropiados para un futuro sistema de transporte urbano sin semáforos, ya que podrían funcionar completamente mediante una base de datos centralizada que identifique y coordine el movimiento de todos los vehículos en cada intersección. Esta tecnología permite mantener una velocidad media más elevada y optimizar integralmente el transporte.

Esta reflexión sobre el potencial del vehículo autónomo y compartido es personal, aunque probablemente representa el futuro del transporte urbano, dada su capacidad para integrar numerosas ventajas en eficiencia, seguridad, sostenibilidad y flexibilidad, ofreciendo un servicio comparable al del taxi, pero adaptado de forma personalizada y óptima a las necesidades específicas de movilidad del usuario.

1.1.2.5 Movilidad compartida y vehículos conectados

La movilidad compartida se ha consolidado como un pilar clave en la transición hacia un transporte sostenible. Modelos como el carsharing y el carpooling han demostrado su capacidad para reducir emisiones, mitigar la congestión urbana y optimizar el uso de recursos. Según un estudio de Oliver Wyman, se espera que esta modalidad duplique su participación en el transporte urbano, alcanzando un 7% del total para 2030[16].

El carsharing permite alquilar vehículos por minutos u horas, mientras que el ridesharing conecta a usuarios que comparten trayectos. Ambos modelos reducen la necesidad de poseer un vehículo privado, disminuyen el número de vehículos en circulación y, en consecuencia, las emisiones asociadas.

La digitalización ha potenciado estas prácticas mediante plataformas integradas bajo el modelo de "Movilidad como Servicio" (MaaS), que combinan transporte público, compartido y privado en una única interfaz. A ello se suma el desarrollo de vehículos autónomos compartidos, capaces de operar sin conductor y optimizar su uso dentro de flotas coordinadas.

Además, la logística compartida se presenta como una estrategia eficaz para reducir los viajes de última milla en el transporte de mercancías, minimizando costes e impacto ambiental.

Uno de los desarrollos más prometedores es la movilidad compartida completamente conectada: flotas autónomas que recogen a pasajeros con rutas compatibles, coordinadas mediante algoritmos e inteligencia artificial, optimizando tiempos de espera, consumo energético y ocupación vehicular. Esta visión plantea un ecosistema urbano eficiente, sin combustibles fósiles, y con un servicio de movilidad tan personalizado como el taxi tradicional, pero optimizado para las necesidades colectivas del entorno urbano.

1.1.2.6 Transporte personal Coche-Moto

El principal problema de contaminación procede del sector de transporte privado como coche o moto, estos son lo más comunes y se deben buscar soluciones de carácter inmediato o soluciones que requieran mayor inversión estatal. **Existen soluciones sostenibles de carácter inmediato que pueden implementarse sin necesidad de alterar significativamente los métodos de transporte de los usuarios o la ubicación de las necesidades urbanas.** Una de las estrategias más eficaces para abordar problemas de tráfico y movilidad es optimizar el flujo vehicular, minimizando la necesidad de frenadas frecuentes y reduciendo así los tiempos de desplazamiento y las emisiones asociadas.

Un enfoque clave en este ámbito es el uso de bases de datos en tiempo real para monitorizar y gestionar el flujo de vehículos en las calles. Estas herramientas permiten redirigir el tráfico hacia vías alternativas cuando una calle está próxima a alcanzar su capacidad máxima admisible, optimizando así la circulación y evitando congestiones. Este tipo de soluciones son aplicables tanto en ciudades altamente sostenibles como en aquellas que buscan mejorar su infraestructura de movilidad.

1.1.2.7 Recolección de datos en zonas concretas

La movilidad sostenible y todas las industrias van en una dirección clara, la disposición y procesamiento de datos. El conocimiento de los datos hace que se puedan sacar conclusiones que previamente sin la disposición de ellos y su procesamiento es imprescindible para sacar un gran número de conclusiones que sin los datos sería muy complicado comprender.

Es imprescindible que la movilidad se adapte a poder procesar los datos en tiempo real y ayude a generar flujos de tráfico mucho más eficientes.

La adopción masiva de tecnologías avanzadas tiene el potencial de transformar significativamente la movilidad urbana. La recopilación y análisis de datos en tiempo real proporcionados por los vehículos permiten diseñar sistemas de gestión de tráfico más eficientes. Por ejemplo, es posible sincronizar semáforos para optimizar el flujo vehicular o reconfigurar temporalmente el sentido de las calles en función de las demandas específicas de tráfico en un momento dado. Estas medidas no solo reducen los tiempos de desplazamiento entre dos puntos (de A a B), sino que también incrementan la velocidad media de los vehículos.

La mejora en la fluidez del tráfico genera beneficios tangibles, como la disminución del consumo de combustible y la reducción de la huella de carbono. Cada vez que un vehículo frena, se disipa energía mecánica generada previamente por el motor, una energía cuya producción conlleva costes ambientales significativos. Minimizar estas pérdidas es clave para aumentar la eficiencia energética. Además, el consumo de combustible por kilómetro recorrido tiende a ser menor a velocidades medias estables y optimizadas, reforzando los beneficios de una gestión inteligente del tráfico. Ambas mejoras contribuyen a una movilidad más sostenible y a una experiencia de usuario más eficiente.

La gestión inteligente de datos vehiculares representa uno de los mayores avances en movilidad, junto con la implementación de vehículos autónomos y sistemas de transporte compartido. Imaginemos una ciudad donde todos los vehículos comparten información sobre sus rutas de origen y destino: los usuarios podrían alcanzar sus destinos más rápidamente, recorriendo rutas

optimizadas y encontrando semáforos sincronizados para minimizar detenciones. Además, el uso dinámico de todas las calles, independientemente de su configuración inicial, permitiría maximizar la capacidad de la infraestructura existente.

Podemos inferir que este tipo de tecnologías puede ser las que con una gran aceptación no sería necesario más que el desarrollo del problema de optimización. Además del procesamiento de los datos, el desarrollo de los vehículos autónomos es parte primordial en la reducción significativa del tiempo de transporte. La mayor pega que hay en el aprovechamiento de los datos de velocidad tipo de vehículo y ubicación es que hay algo que no lo incluyen los datos y es el conductor, se pueden capturar los datos de los usuarios y sobre su conducción, pero no se puede cambiar la forma de comportarse ante ciertas situaciones. En cambio, el vehículo autónomo es capaz de comportarse según se le programe. Concretamente el principal problema es que un conductor siente peligro, y esto afecta a varias situaciones en las que se ralentizaría el viaje, y hay que tener en cuenta que cada vez que se ralentiza un coche, se ralentiza un carril e incluso se ralentizan carriles cercanos o incluso calles paralelas. Además, otra de las cosas que afecta al flujo no solo es la velocidad, también influye el volumen de vehículos que hay en la vía.

Dicho esto, la problemática del flujo vehicular se puede resumir en 3 soluciones que resolvería eficientemente el vehículo eléctricoº:

- Reducir al máximo la distancia de un vehículo al que tiene delante. La distancia de seguridad no puede disminuir sin una mejora en la velocidad de reacción de la población, o sin un vehículo autónomo (el cual ya tiene una velocidad de reacción superior a la humana).
- Reducir al máximo los cambios de carril que puedan suponer una deceleración del nuevo carril.
- Eliminación de leyes viales para los coches, esta es la medida más importante ya que soluciona dos de los mayores problemas
 - El uso del freno que reduce la velocidad media de transporte por carril

- Las limitaciones de velocidad debidas a la necesidad de frenado por el tiempo de reacción y reducción de los daños en accidentes, de nuevo aumenta la velocidad vehicular por carril

La recopilación de datos en tiempo real puede realizarse mediante diversas tecnologías, que se dividen en dos grandes categorías según su ubicación:

Sensores y dispositivos fijos en la infraestructura urbana

Estas tecnologías recopilan información desde ubicaciones específicas, como calles, intersecciones o puntos estratégicos dentro de la ciudad. Algunos ejemplos incluyen:

- **Cámaras de tráfico:** Instaladas en pórticos o semáforos, estas cámaras proporcionan información básica sobre velocidad, ubicación y densidad vehicular. Aunque su implementación puede ser costosa, son útiles para proyectos específicos de gestión de tráfico.
- **Sensores en pavimento:** Dispositivos integrados en la calzada que detectan el peso, número de vehículos y su velocidad, ayudando a identificar puntos críticos de congestión.
- **Drones de monitoreo:** Equipados con cámaras y sensores, los drones ofrecen una vista aérea del flujo vehicular, ideal para monitorear eventos masivos, accidentes o congestiones en tiempo real.
- **Farolas y semáforos inteligentes:** Incorporan sensores de movimiento o cámaras que recopilan datos sobre el tránsito vehicular y peatonal.
- **Balizas BLE (Bluetooth Low Energy):** Dispositivos instalados en puntos estratégicos que interactúan con teléfonos móviles o vehículos para medir tiempos de paso y densidad de tráfico.

Estas herramientas permiten analizar el comportamiento del tráfico en puntos fijos y optimizar la gestión de la infraestructura urbana.

1.1.2.8 Dispositivos móviles dentro de los vehículos

Estas tecnologías recopilan datos directamente desde los vehículos en cualquier ubicación por la que transiten. Algunos ejemplos incluyen:

- **OBD Trackers (On-Board Diagnostics Trackers):** Dispositivos conectados al puerto OBD-II de los coches que recopilan información detallada sobre aceleraciones, frenadas bruscas, excesos de velocidad y rutas.
- **Aplicaciones móviles de navegación:** Apps como Waze o Google Maps recopilan datos de ubicación y tiempos de viaje, ofreciendo información masiva y actualizada en tiempo real.
- **Sensores integrados en vehículos autónomos:** Los vehículos autónomos están equipados con sensores avanzados que capturan datos precisos sobre las condiciones del tráfico y el entorno.

1.1.3 INFRAESTRUCTURAS INTELIGENTES PARA TRANSPORTE PÚBLICO

SOSTENIBLE

La movilidad sostenible no puede concebirse sin un sistema de transporte público eficiente, accesible y limpio. Este pilar fundamental de la transición hacia ciudades habitables y bajas en carbono destaca por su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la calidad de vida urbana.

1.1.3.1 Sustitución de Flotas por Vehículos Limpios

Una de las estrategias más importantes para avanzar hacia un transporte público sostenible es la renovación de flotas tradicionales por vehículos eléctricos e híbridos. Estas tecnologías eliminan las emisiones locales y mejoran significativamente la calidad del aire en las ciudades. Según un estudio de la Universidad de Glasgow, los autobuses eléctricos han demostrado ser eficaces en la

reducción de enfermedades respiratorias relacionadas con la contaminación, marcando un impacto directo en la salud de las comunidades urbanas.

1.1.3.1.1 Modernización y Expansión de Redes Ferroviarias

Los sistemas ferroviarios eléctricos son una alternativa sostenible y eficiente para el transporte tanto urbano como interurbano. La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) estima que estas redes pueden ahorrar hasta un 40% de energía en comparación con alternativas basadas en combustibles fósiles. La modernización y ampliación de estas infraestructuras permiten reducir la congestión en las carreteras, mejorar la puntualidad de los servicios y disminuir la huella de carbono del transporte público.

1.1.3.1.2 Accesibilidad y Tarifas Equitativas

Garantizar que el transporte público sea accesible para todos es esencial para promover su adopción masiva. Medidas como tarifas reducidas o incluso la gratuidad en algunos casos pueden incrementar significativamente el uso del transporte público. Por ejemplo, el Instituto Fraunhofer señala que estas políticas han incrementado su uso en un 25%, especialmente en comunidades vulnerables. De igual manera, la Universidad Nacional de Singapur destaca que mejorar la accesibilidad del transporte público puede incrementar la movilidad de personas con discapacidades en un 15%, subrayando la importancia de diseñar infraestructuras inclusivas y universales.

1.1.3.1.3 Sistemas Multimodales e Inteligencia Artificial

La integración de diferentes modos de transporte en redes multimodales ofrece una solución eficiente para reducir emisiones y optimizar los desplazamientos urbanos. Según un estudio de la Universidad de Delft, combinar autobuses, trenes y bicicletas compartidas a través de plataformas integradas mejora la eficiencia del transporte público en un 35%. Además, la implementación de inteligencia artificial (IA) permite gestionar rutas, ajustar horarios y

redistribuir recursos en tiempo real. El MIT ha demostrado que el uso de estas tecnologías puede reducir los tiempos de viaje en un 20%, mejorando tanto la experiencia del usuario como la sostenibilidad del sistema.

1.1.3.1.4 Soluciones Innovadoras: Teleféricos Urbanos

En áreas urbanas complejas o de difícil acceso, los teleféricos urbanos surgen como una alternativa sostenible e innovadora. Según el Banco Mundial, estos sistemas pueden reducir las emisiones en un 30% y minimizar el impacto ambiental al evitar grandes obras de infraestructura. Este enfoque resulta especialmente útil en ciudades densamente urbanizadas, donde complementa otras soluciones como autobuses eléctricos y trenes, proporcionando conectividad adicional de manera eficiente.

1.1.3.1.5 Beneficios Directos para la Salud y el Entorno Urbano

El transporte público sostenible no solo contribuye a la reducción de emisiones, sino que también tiene un impacto directo en la calidad de vida de las ciudades. El uso de tecnologías limpias, como los trenes eléctricos, disminuye la contaminación acústica en un 50%, según la Universidad Politécnica de Milán. Esta reducción no solo mejora la salud de los ciudadanos, sino que transforma los entornos urbanos en espacios más habitables y saludables.

En conjunto, estas estrategias muestran cómo un sistema de transporte público bien planificado e implementado puede convertirse en un motor de cambio hacia ciudades más sostenibles, eficientes e inclusivas.

1.1.4 MOVILIDAD COMPARTIDA

La movilidad compartida se ha consolidado como un componente esencial en la promoción de la movilidad sostenible en las ciudades contemporáneas. Este modelo, que incluye prácticas como el carsharing y el carpooling, ofrece soluciones efectivas para mitigar la congestión urbana y

reducir las emisiones contaminantes. Según un estudio de Oliver Wyman, se prevé que la movilidad compartida duplique su participación en el transporte urbano, pasando del 3% actual al 7% estimado para 2030, con un mercado que alcanzaría cerca de 400.000 millones de dólares [16]. Este crecimiento refleja una tendencia global hacia la adopción de soluciones de transporte más eficientes y sostenibles.

El **carsharing**, que permite a los usuarios alquilar vehículos por horas o minutos, optimiza el uso de recursos y reduce la necesidad de poseer automóviles privados. Al mismo tiempo, el **ridesharing**, a través de aplicaciones que conectan a personas para compartir trayectos, disminuye el número de vehículos en circulación, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones. Estas prácticas no solo alivian la congestión urbana, sino que también promueven una economía colaborativa al compartir costes de transporte y optimizar los recursos disponibles.

La integración de herramientas digitales bajo el modelo de **Movilidad como Servicio (MaaS)** también desempeña un papel crucial en la movilidad compartida. Estas plataformas digitales combinan diferentes modos de transporte —público, compartido y privado— en una única aplicación, facilitando la planificación y reserva de trayectos para los usuarios. Según expertos, este enfoque no solo mejora la experiencia de los pasajeros, sino que también fomenta el uso eficiente de las redes de transporte.

Además, los avances tecnológicos han impulsado el desarrollo de **vehículos autónomos compartidos**, una solución innovadora que elimina los tiempos muertos de los vehículos, optimizando su uso y aumentando la eficiencia en entornos urbanos. Estos vehículos autónomos tienen el potencial de reducir aún más las emisiones y la congestión al operar de manera coordinada dentro de una flota gestionada.

En el ámbito de la logística, la **logística compartida** ha surgido como una estrategia clave para reducir los viajes de última milla, especialmente en el transporte de mercancías. Implementar

sistemas de reparto colaborativo permite optimizar las rutas de entrega, disminuir los costes y minimizar el impacto ambiental asociado al transporte de bienes.

La implementación de servicios de **carsharing y carpooling** ha demostrado beneficios ambientales significativos. Al compartir vehículos, se optimiza su uso, lo que se traduce en una disminución del número de automóviles en circulación y, por ende, en una reducción de las emisiones de CO₂. Según Celering, estas prácticas contribuyen activamente a la conservación del medio ambiente y a la mejora de la calidad del aire en entornos urbanos [17].

Además de los beneficios ambientales, la movilidad compartida ofrece ventajas económicas y sociales. Al reducir la necesidad de poseer un vehículo privado, los usuarios pueden ahorrar en costes asociados al mantenimiento, combustible y estacionamiento. Asimismo, este modelo promueve la interacción social y fortalece la cohesión comunitaria, al fomentar la colaboración entre individuos para desplazarse de manera eficiente [18].

Un ejemplo de la eficacia de estos sistemas es cómo los programas de carpooling han demostrado ser una herramienta poderosa para reducir la congestión urbana. Según Motorpress Digital, un aumento en la adopción de estas prácticas podría reducir en un 7% la congestión en grandes ciudades, mejorando significativamente la calidad de vida de los ciudadanos [19].

Además, la intermodalidad dentro de la movilidad compartida, que combina diferentes modos de transporte como bicicletas compartidas y transporte público, amplía las opciones de desplazamiento sostenible y flexible para los usuarios [20].

Sin embargo, la expansión de la movilidad compartida enfrenta desafíos que deben ser abordados para maximizar su potencial. La integración efectiva con otros modos de transporte, la adaptación de infraestructuras urbanas y la aceptación cultural son aspectos clave que requieren atención. Es fundamental desarrollar políticas públicas que promuevan y regulen estos servicios, garantizando su accesibilidad y sostenibilidad a largo plazo.

En este contexto, la movilidad compartida representa una estrategia viable y efectiva para avanzar hacia sistemas de transporte más sostenibles. Su capacidad para reducir emisiones, descongestionar las vías urbanas y ofrecer alternativas económicas a la movilidad tradicional la posiciona como un elemento central en la planificación urbana del futuro.

La movilidad compartida representa una de las formas más eficientes, accesibles y prácticas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, posicionándose como un pilar clave en la transición hacia un transporte sostenible. Como se discutió previamente, el uso compartido de vehículos no solo optimiza el espacio en carretera, sino que también genera beneficios significativos en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa.

El transporte compartido fomenta una utilización más eficiente de los vehículos, reduciendo el deterioro por infrautilización y promoviendo ciclos de vida más cortos y efectivos para las flotas. Esto, a su vez, impulsa una renovación constante y tecnológica de las flotas vehiculares, asegurando que se adopten modelos más modernos, conectados y sostenibles. Además, al disminuir el número de vehículos necesarios en circulación, se logra una reducción tangible en la congestión vial, mejorando la calidad de vida urbana y maximizando el uso de los recursos disponibles.

Uno de los puntos más destacados de la movilidad compartida es su sinergia con el desarrollo de tecnologías avanzadas, como los vehículos autónomos y conectados. Estas innovaciones prometen revolucionar la forma en que nos movemos, al facilitar una movilidad más fluida y eficiente gracias al uso de datos en tiempo real. Actualmente, los atascos y las constantes paradas y arranques son responsables de un consumo elevado de combustible, lo que genera un impacto ambiental significativo. Mediante aplicaciones que optimizan rutas y proponen alternativas basadas en datos de tráfico en tiempo real, es posible reducir considerablemente las emisiones y, en muchos casos, llegar al destino más rápido, incluso tomando caminos más largos pero menos congestionados.

La verdadera revolución, sin embargo, radica en el concepto de **movilidad compartida completamente conectada**. Imaginar flotas de vehículos autónomos capaces de recoger a pasajeros que comparten rutas similares, realizar transbordos eficientes entre vehículos (de manera análoga a un sistema de metro) y tomar decisiones óptimas basadas en algoritmos avanzados, ya no es un ideal lejano. La integración de inteligencia artificial en estos sistemas asegura que las rutas y horarios sean diseñados para minimizar los tiempos de espera y el consumo energético, todo ello maximizando la satisfacción del usuario.

El futuro de la movilidad apunta a un ecosistema impulsado por inteligencia artificial, donde los usuarios podrán moverse hacia sus destinos de forma eficiente, segura y sin consumir combustibles fósiles. Esta visión no solo promete reducir las emisiones y la congestión, sino también transformar radicalmente nuestras ciudades en entornos más limpios, dinámicos y habitables. La movilidad compartida, respaldada por tecnologías avanzadas y conectividad, será un elemento central en esta transformación hacia un transporte verdaderamente sostenible.

1.1.5 HUBS DE MOVILIDAD

Como se abordará en el próximo capítulo sobre movilidad compartida, una de las estrategias clave para la reducción de emisiones contaminantes es minimizar la dependencia del usuario del vehículo privado con motor de combustión. En este contexto, los **hubs de movilidad** desempeñan un papel fundamental al integrar en un único punto diferentes opciones de transporte público y movilidad sostenible, facilitando la transición entre modos de manera eficiente.

Infraestructuras como la estación de Chamartín en Madrid, que combina trenes de larga distancia, cercanías, autobuses, taxis, estacionamiento de vehículos y conexiones para bicicletas,

ejemplifican cómo un **hub multimodal** puede optimizar la conectividad urbana y fomentar el uso de alternativas de transporte con menor impacto ambiental.

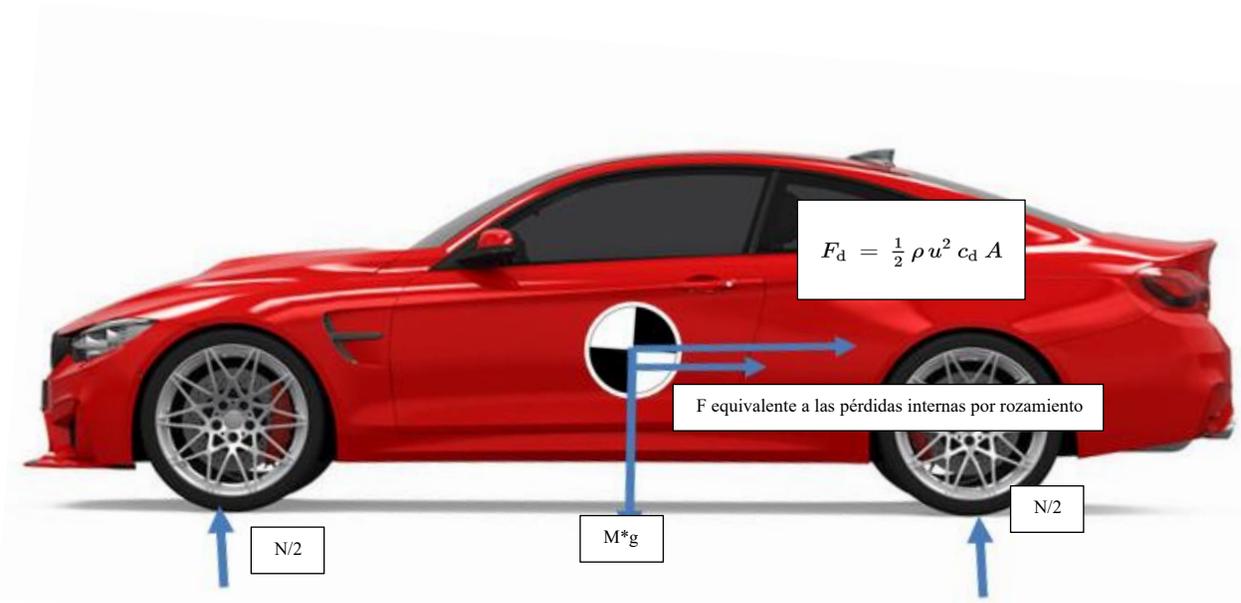
El diseño urbano del futuro se orienta hacia un **modelo descentralizado de hubs de movilidad**, promoviendo desplazamientos más eficientes, sostenibles e interconectados. En lugar de depender de un sistema de transporte basado en un único centro neurálgico, la tendencia apunta hacia una red distribuida de hubs interconectados, permitiendo a los ciudadanos moverse de manera ágil dentro de una **mall urbana policéntrica**.

En el marco de las **ciudades de 15 minutos**, cada distrito o barrio contará con un **hub de proximidad**, accesible a pie o en bicicleta, que conectará a los residentes con la red de transporte público y de movilidad compartida. Además de su función como nodo de transporte, estos hubs se consolidarán como **centros neurálgicos de actividad comercial y de servicios**, optimizando su ubicación estratégica en zonas de alta afluencia y reforzando su papel como impulsores del desarrollo económico local

1.1.6 MOVILIDAD VERTICAL AEROTAXIS COMO SOLUCIÓN DE TRANSPORTE

Durante décadas la sociedad ha soñado con la posibilidad de contar con coches voladores, inspirándose en visiones futuristas donde el transporte aéreo personal era la norma. Sin embargo, aunque esta imagen evoca innovaciones y una movilidad sin atascos, la realidad es que los helicópteros –que comparten la capacidad de despegar y aterrizar verticalmente– ya existen desde hace años. En las películas de ciencia ficción, los coches voladores se planteaban como una solución capaz de disponer de múltiples carriles en el aire, eliminando los cruces y las esperas propias del tráfico terrestre. No obstante, muchas de las ventajas atribuidas a estos vehículos pueden conseguirse en la actualidad mediante infraestructuras como puentes, que permiten superar obstáculos sin interrumpir el flujo vehicular.

Para comprender porque los vehículos terrestres son tan eficientes comparemos el diagrama de fuerzas y comprendamos que necesidades técnicas debe cumplir la fuerza del motor.



Desde un punto de vista energético, el transporte terrestre resulta significativamente más eficiente. En un automóvil, el par generado en las ruedas se transforma en fuerza de tracción a lo largo del eje horizontal, gracias a la relación $F = \alpha \cdot r$ —donde la aceleración angular (α) y el radio de la rueda (r) definen la fuerza transmitida. A esta fuerza debemos sustraerle dos fuerzas que van en contra del movimiento del vehículo: la resistencia aerodinámica y el rozamiento. Es importante notar que las fuerzas verticales no requieren potencia adicional en el movimiento; únicamente se necesita potencia para superar la inercia en el eje horizontal, si queremos acelerar.

En contraste, los helicópteros y, por extensión, los aerotaxis, deben generar no solo la fuerza necesaria para avanzar en el plano horizontal, sino también una potencia extra para producir el lift que debe ser mayor o igualar al peso del vehículo multiplicado por la aceleración de la gravedad. Esta doble exigencia energética se traduce en una eficiencia menor en comparación con el transporte terrestre.

No obstante, el sistema terrestre presenta limitaciones inherentes. Las carreteras rara vez permiten recorrer la distancia más corta entre dos puntos, ya que su trazado se ve condicionado por la

topografía y las infraestructuras existentes. Además, la congestión y los atascos son problemas crónicos en las grandes urbes, afectando tanto la experiencia de viaje como la eficiencia global del sistema. En este contexto, los aerotaxis ofrecen una ventaja decisiva: al operar en el espacio aéreo, son capaces de seguir trayectos más directos y evitar los embotellamientos característicos del transporte por tierra, lo que podría traducirse en desplazamientos más rápidos y eficientes en entornos urbanos densamente poblados.

Esta comparación subraya que, aunque el transporte terrestre es energéticamente más eficiente y está mejor consolidado en términos de infraestructura, la movilidad aérea –y en particular los aerotaxis– representa una solución prometedora para sortear las limitaciones del sistema actual, especialmente en lo que se refiere a la reducción de la congestión y la optimización de las rutas en las grandes ciudades.

Los aerotaxis son una tecnología innovadora con gran potencial para aliviar la congestión urbana y reducir los tiempos de viaje en áreas densamente pobladas; sin embargo, debido a sus elevados costes operativos y la necesidad de infraestructuras especializadas, su mercado se concentra en aplicaciones específicas como servicios de emergencia o traslados ejecutivos en lugar de sustituir el uso masivo del coche tradicional.

1.1.6.1 La utilidad del transporte vertical

Es el transporte capaz de cubrir la necesidad de transporte de un punto a cualquier otro en la menor distancia posible. La menor distancia posible sumándole que también nos desplazaríamos en un vehículo más rápido que el coche, y sumándole evitar la congestión que existe en las carreteras, lo hace un transporte especialmente viable y de gran capacidad para usos como emergencias.

Una de las ventajas es su sostenibilidad, los eVTOL son vehículos impulsados por propulsión eléctrica y a diferencia de otras opciones de transporte tiene unos niveles de ruido bajos. Estas capacidades de los aerotaxis son imprescindibles para las ciudades, ya que a día de hoy es imprescindible tener en cuenta las emisiones, sobre todo en ciudades que normalmente ya tienen altos niveles de contaminación.

Estos vehículos tienen la autonomía como principal ventaja. El hecho de que los aerotaxis sean económicamente rentable se basa en la sustracción de el coste de un operario al cargo de la conducción. Los protocolos de los eVTOL ayudan a una mayor seguridad en la toma de decisiones y la activación de protocolos.

1.1.6.2 Que necesita el mercado de aerotaxis para despegar

Como hemos mencionado previamente, una de las principales ventajas de los eVTOL es su capacidad para mitigar la congestión del tráfico. Sin embargo, la infraestructura urbana actual no está diseñada para la integración de vehículos eléctricos y, mucho menos, para aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical.

La única forma viable de incorporar estos servicios en las ciudades sin requerir modificaciones urbanísticas de gran escala es mediante la instalación de plataformas de aterrizaje y despegue en las cubiertas de los edificios. Otra alternativa son los vertipads, plataformas modulares y transportables que pueden instalarse en estructuras existentes o colocarse temporalmente en zonas urbanas. Su principal ventaja es la flexibilidad, ya que permiten que los eVTOL operen en la vía pública sin necesidad de infraestructura fija. No obstante, su mayor limitación radica en la disponibilidad de puntos de carga, lo que restringe su operatividad.

Para abordar esta problemática, se han desarrollado los vertihubs, centros de operación que no solo proporcionan infraestructura de aterrizaje y estacionamiento, sino que también ofrecen servicios de carga y gestión del tráfico aéreo. Dado que el elevado coste de los aerotaxis es una de las principales barreras para su adopción, los vertihubs pueden representar la opción más eficiente desde el punto de vista económico, permitiendo optimizar costes a través de economías de escala.

Por el contrario, modelos más flexibles, como los vertipads transportables, presentan desafíos en términos de rentabilidad. Su despliegue requiere vehículos de transporte, ya sea con conductor o

mediante sistemas autónomos, además del coste asociado al combustible o energía necesaria para su movilidad. Esta dependencia logística dificulta la reducción de costes operativos, lo que podría limitar su escalabilidad como solución principal en la movilidad aérea urbana.

La integración de los aerotaxis requiere una infraestructura altamente sofisticada. Como hemos señalado, el coste para los usuarios sigue siendo elevado y la producción en masa de estos vehículos aún no se ha materializado. Para que esta industria alcance su madurez, es fundamental que avance hacia una reducción de los costes de fabricación a través de la optimización de procesos y economías de escala.

Además del reto económico, otro desafío clave es el desarrollo de un marco regulatorio que garantice la seguridad y viabilidad operativa de los aerotaxis. La creación de normativas específicas será esencial para gestionar su uso en el espacio aéreo urbano, estableciendo criterios para el tráfico, la certificación de aeronaves y los procedimientos de operación. Sin estos avances, la adopción generalizada de la movilidad aérea urbana seguirá siendo limitada.

1.1.7 EFICIENCIA DE LOS MOTORES

Las opciones de transporte requieren energía para superar diferencias de energía potencial y cubrir distancias, por lo que el vehículo elegido debe ser lo más eficiente posible. Los motores eléctricos destacan claramente como la mejor opción, no solo por su rendimiento, sino también por una serie de ventajas adicionales:

1. **Eficiencia energética sobresaliente:** Los motores eléctricos convierten hasta un 95% de la energía en movimiento útil, en comparación con el 30-40% de los motores térmicos.
2. **Cero emisiones locales:** Los vehículos eléctricos no producen emisiones directas de gases de efecto invernadero ni contaminantes como óxidos de nitrógeno o partículas, mejorando la calidad del aire en áreas urbanas.

3. **Simplicidad mecánica:** Al tener menos piezas móviles, los motores eléctricos son más fiables, requieren menos mantenimiento y tienen una vida útil más prolongada, reduciendo costes y el impacto ambiental de su fabricación y operación.
4. **Energía renovable:** Pueden alimentarse completamente con electricidad generada por fuentes renovables, eliminando la dependencia de combustibles fósiles.
5. **Recuperación de energía:** Los motores eléctricos incorporan tecnologías como el frenado regenerativo, que devuelve energía a las baterías durante la desaceleración, mejorando aún más su eficiencia.
6. **Reducción de ruido:** Funcionan de manera extremadamente silenciosa, contribuyendo a una reducción significativa de la contaminación acústica en ciudades.
7. **Flexibilidad en el diseño:** Su tamaño compacto permite diseñar vehículos más ligeros y aerodinámicos, optimizando aún más el consumo de energía.

A lo largo de la historia, los motores han evolucionado considerablemente. Las primeras máquinas de vapor del siglo XVIII, con eficiencias del 5-10%, marcaron un comienzo rudimentario. Posteriormente, surgieron motores como el Stirling, con una eficiencia teórica del 40-50%, aunque sus aplicaciones prácticas eran limitadas. Los motores de combustión interna, como el Otto y el diésel, lograron eficiencias de entre el 25-40%, mientras que las turbinas de gas alcanzaron el 35-45%. Por otro lado, los motores cohete, diseñados para el vacío, convirtieron hasta un 60-70% de la energía química en empuje útil.

El verdadero salto llegó con los motores eléctricos, que no solo son los más eficientes, con rendimientos del 80-95%, sino que también pueden integrarse en sistemas energéticos renovables. Su capacidad de combinar eficiencia energética, sostenibilidad y ventajas prácticas los posiciona como la opción más sostenible para la movilidad del futuro.

EL PAPEL DE LAS BATERÍAS EN LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

La electricidad ha transformado profundamente nuestra comprensión y uso de la energía, consolidándose como una forma única e insustituible de energía debido a su versatilidad y capacidad de transporte eficiente. Este cambio de paradigma ha reconfigurado la manera en que concebimos la generación y el consumo de energía, desplazando tecnologías tradicionales como los motores de combustión interna y las máquinas de vapor.

Sin embargo, pese a sus innegables ventajas, la electricidad presenta limitaciones inherentes, como la imposibilidad de almacenamiento directo en grandes volúmenes y la necesidad de una infraestructura robusta para su transporte y distribución. En este contexto, las baterías surgen como el complemento perfecto para superar estos desafíos. Al permitir el almacenamiento eficiente de energía y su liberación controlada según las necesidades, las baterías no solo maximizan el aprovechamiento de la electricidad, sino que también refuerzan la resiliencia del sistema energético ante variaciones en la demanda o interrupciones en el suministro.

Al integrar la electricidad con soluciones avanzadas de almacenamiento como las baterías, estamos construyendo un modelo energético que combina flexibilidad y estabilidad. Este enfoque no solo responde a las necesidades inmediatas de la transición energética, sino que también sienta las bases para un sistema sostenible y resiliente capaz de evolucionar frente a los desafíos del futuro.

1.1.8 BATERÍAS COMO TECNOLOGÍA CLAVE

Lo que hace a las baterías uno de los mejores métodos de almacenamiento energético es la posibilidad de que esa energía provenga de fuentes renovables. Como ya se ha comentado el único método de transporte rápido de energía-combustible es la electricidad. La velocidad de un camión o barco que transporte combustible no sobrepasa los 100km/h mientras que la electricidad pasa por los cables de cobre a 150,000 a 270,000 km/s.

Las baterías permiten múltiples métodos de captura energética siendo por tanto el método más diverso de opciones de combustibles, las opciones son múltiples.

1.1.9 VENTAJAS FRENTE A OTRAS OPCIONES

La principal ventaja de el combustible eléctrico es el rendimiento que se puede obtener de los motores eléctrico es del 90% frente a rendimientos de motes de gasolina y diésel que tienen entre 25-40% de rendimiento, esto es un factor diferenciador, ya que en el caso de tener densidades energéticas de combustible iguales el consumo energético podría disminuir. La verdadera ventaja de los coches eléctricos es los costes de mantenimiento mucho más reducidas que en los coches de combustión, esto se debe a la forma que tiene cada vehículo de generar el movimiento, los motores de combustión sufren grandes temperaturas con gran número de piezas en movimiento lo que lleva a posibles rozamientos entre piezas que pueden generar residuos que comprometan el estado del motor. Por el contrario, los motores eléctricos son muy minimalistas, dispuestos de un rotor y un estator, de los cuales únicamente están en contacto los rodamientos, por lo que los problemas de mantenimiento no provienen nunca del motor.

Los sistemas de frenado permiten la recuperación de gran parte de la energía que se consume, estos coches pueden generar energía si es el rotor el que transmite el par al estator y no al revés. Existen distintos modos, unos cargan el coche siempre que el acelerador no esté pisado, y otros modos usan el freno a motor con el uso de freno.

1.1.10 IMPACTO AMBIENTAL DE LAS BATERÍAS

Según un informe de McKinsey la producción de vehículos eléctricos genera un 80% más de emisiones de CO₂ que la producción de vehículos convencionales. Desglosemos estas emisiones dividiéndolas en la cadena de suministro.

1.1.11 ELECTRIFICACIÓN DEL TRANSPORTE

La electrificación del transporte constituye una de las estrategias más potentes para avanzar hacia la descarbonización del sector. No obstante, su implementación enfrenta un obstáculo técnico crucial: la necesidad de una infraestructura de recarga robusta y distribuida, especialmente en países como España, donde la red actual presenta limitaciones significativas.

Actualmente, los vehículos eléctricos (VE) aún están condicionados por su autonomía y los tiempos de recarga, lo que restringe su adopción masiva, especialmente para desplazamientos interurbanos o en entornos rurales. A diferencia de los combustibles fósiles, cuya red de distribución está madura y extendida, la red de recarga eléctrica necesita una inversión estructural urgente para alcanzar un nivel de conveniencia y disponibilidad equivalente.

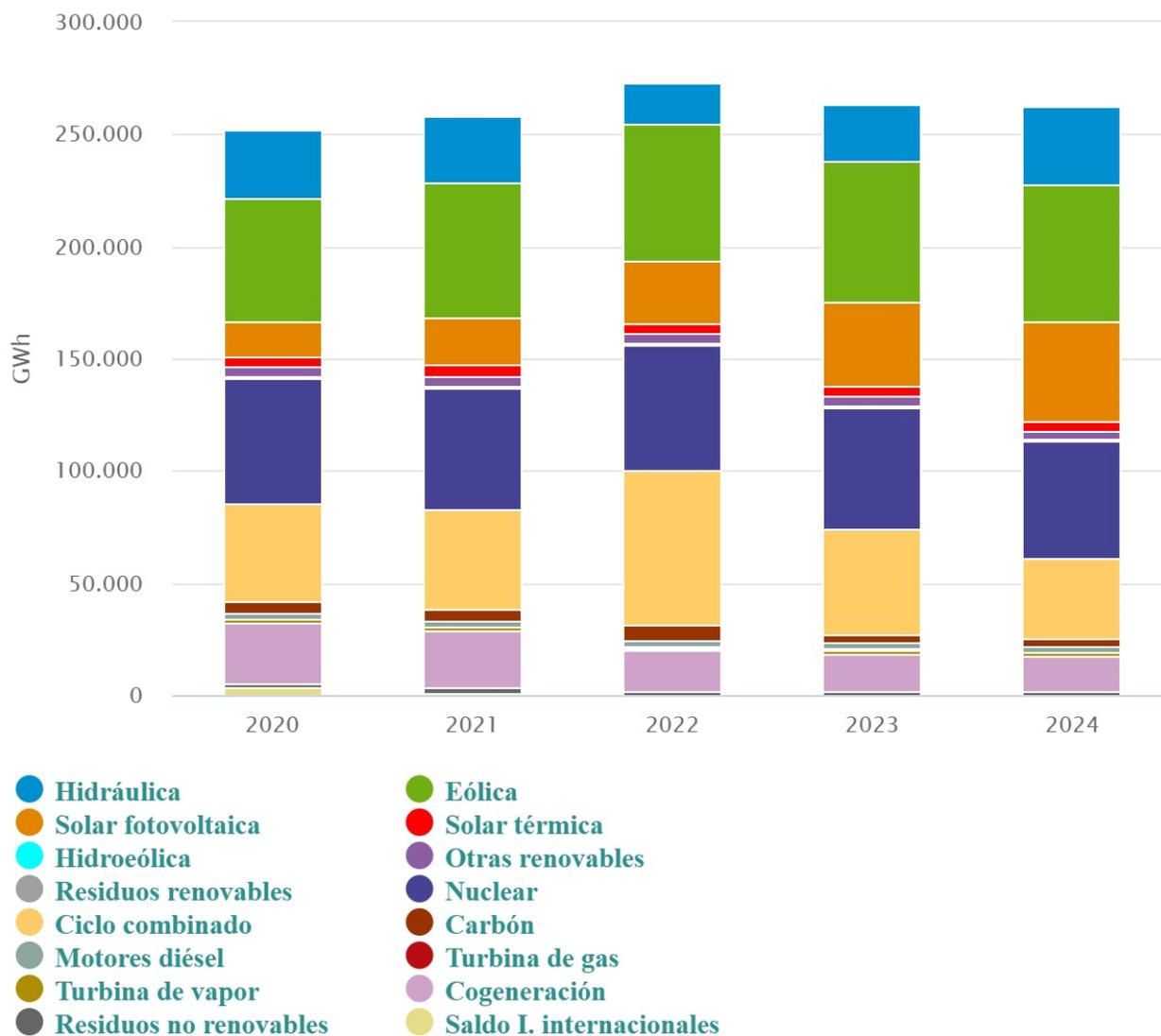
En este sentido, España enfrenta una brecha crítica. Aunque se ha avanzado en la promoción del vehículo eléctrico mediante subvenciones e incentivos fiscales, la expansión de puntos de recarga —especialmente ultrarrápidos— no ha seguido el mismo ritmo. Según estimaciones del sector, se requerirá multiplicar por diez la infraestructura de recarga disponible para que la electrificación del parque móvil español sea viable a medio plazo. Esta transformación no se limita a instalar más cargadores, sino que exige reforzar y digitalizar las redes eléctricas urbanas y regionales para soportar una demanda energética creciente y más distribuida.

Además, tecnologías emergentes como el sistema Vehicle-to-Grid (V2G) ofrecen un enfoque disruptivo: transformar los propios vehículos eléctricos en nodos energéticos. Gracias al V2G, los VE no solo consumen electricidad, sino que también pueden devolverla a la red en momentos críticos, estabilizando el suministro, reduciendo picos de demanda y facilitando la integración de energías renovables intermitentes como la solar o la eólica. Este modelo aporta resiliencia al sistema energético y puede generar ingresos adicionales para los propietarios de vehículos.

A pesar de su potencial, la implementación del V2G requiere una red eléctrica más inteligente, capaz de gestionar flujos bidireccionales y responder en tiempo real. Sin esta base tecnológica y regulatoria, el modelo no podrá desplegarse de forma efectiva.

SISTEMAS DE CARGA ELÉCTRICA

Los sistemas de carga eléctrica son uno de los pasos imprescindibles para la adopción general de los vehículos y ecosistema de movilidad eléctrica que se espera. Para comprender como se encuentra la infraestructura eléctrica Española, veamos la evolución de la demanda eléctrica a partir de 2020.



Fuente: ree.es

Ilustración 3/Representación de la cobertura de la demanda eléctrica

La demanda eléctrica en España no está sufriendo un aumento en los últimos años, pero ello no implica que la red eléctrica continúe estando en los mismos niveles de saturación. Según datos que he obtenido de red eléctrica he calculado el ratio

$\frac{\text{Capacidad de acceso disponible para MPE}}{\text{Capacidad de acceso nodal}} = 2\%$. Esto muestra como la capacidad disponible en la comunidad de Madrid para la posible implantación de la infraestructura de carga es insuficiente.

Capítulo 2. EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES PARA LA MOVILIDAD

Los combustibles sostenibles son un punto primordial en el desarrollo de una movilidad sostenible, concretamente el hecho de no haber realizado innovación suficiente durante la época de los carburantes ha llevado a unos niveles de contaminación que crecen de forma imparable. Con una correcta selección y adopción de este tipo de combustibles se puede revertir la situación actual.

Para determinar qué combustibles son más adecuados, es esencial comprender las características que definen su sostenibilidad. La primera de estas características es su capacidad de regenerarse de manera continua, es decir, que sean recursos renovables. Los combustibles renovables, al provenir de fuentes que se regeneran de forma natural o con intervención humana en plazos razonables, constituyen una opción más sostenible en comparación con los combustibles no renovables, que son finitos por naturaleza. Las fuentes de energía no renovables, al requerir ciclos de formación extremadamente largos, son inherentemente insostenibles para un uso prolongado.

Un recurso no renovable se define como aquel cuyo ciclo de transformación en combustible es tan lento que no puede reponerse en un tiempo relevante para la humanidad. Por ejemplo, el petróleo tarda millones de años en formarse bajo condiciones específicas de presión y temperatura a partir de materia orgánica en descomposición. De manera similar, el carbón también. En contraste, los biocombustibles convierten biomasa en combustible en plazos significativamente más cortos gracias a la intervención humana, lo que la diferencia de los combustibles fósiles en términos de tiempo de regeneración.

Sin embargo, esta diferencia temporal no exime a los biocombustibles de ciertas limitaciones compartidas con los combustibles fósiles. Ambos tipos de combustible emiten gases de efecto invernadero al combustionar, contribuyendo al calentamiento global. La principal diferencia

radica en el origen del carbono liberado. En el caso de los biocombustibles, el carbono emitido proviene de fuentes que forman parte del ciclo biológico reciente, como cultivos o residuos orgánicos. Por el contrario, el petróleo y el carbón liberan carbono que ha permanecido sellado en la corteza terrestre durante millones de años, alterando el equilibrio natural del ciclo del carbono y aumentando de forma significativa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

El impacto negativo del consumo de combustibles fósiles en la atmósfera se debe precisamente a esta disrupción. Al extraer petróleo o carbón y utilizarlos como combustibles, estamos liberando gases que estaban destinados a permanecer atrapados bajo capas herméticas de tierra. Este proceso no solo incrementa los niveles de dióxido de carbono y otros contaminantes en la atmósfera, sino que también desestabiliza los sistemas climáticos al añadir carbono que no forma parte del ciclo natural actual.

Excluyendo las fuentes no renovables, las opciones más prometedoras incluyen los biocombustibles, la electricidad generada a partir de energías renovables (solar, eólica, hidráulica) y el hidrógeno verde. Estas alternativas tienen el potencial de satisfacer nuestras necesidades energéticas mientras minimizan el impacto ambiental y preservan los recursos para futuras generaciones.

Entre estas opciones, el hidrógeno verde se destaca como un combustible de emisiones cero durante su utilización. Producido mediante la electrólisis del agua usando electricidad de origen renovable, el hidrógeno no solo evita la liberación de gases contaminantes, sino que también constituye una de las pocas soluciones capaces de alcanzar emisiones netas cero en su ciclo completo de vida. Este enfoque no solo busca evitar la contaminación, sino que redefine la sostenibilidad energética al aprovechar fuentes renovables.

Por otro lado, los biocombustibles presentan un caso distinto. Aunque permiten utilizar el carbono almacenado en biomasa, no eliminan por completo las emisiones de gases contaminantes. Estos combustibles convierten la materia orgánica rica en carbono, que de otro

modo se descompondría naturalmente en el suelo, en un recurso energético listo para ser quemado. Si bien esto evita que dicho carbono entre en la atmósfera sin aprovechamiento, interrumpe procesos naturales esenciales para la fertilidad de los ecosistemas, como el reciclaje de nutrientes en los suelos forestales.

Los biocombustibles son útiles en aplicaciones específicas, como en centrales de ciclo combinado, donde proporcionan flexibilidad para cubrir picos de demanda energética. Sin embargo, su dependencia de biomasa rica en carbono limita su sostenibilidad a largo plazo. Por tanto, aunque actualmente juegan un papel importante en la transición energética, deben considerarse como soluciones transitorias que eventualmente deberían ser reemplazadas por fuentes de energía más limpias y sostenibles.

En conclusión, mientras avanzamos hacia un sistema energético más sostenible, es crucial priorizar combustibles como el hidrógeno verde y la electricidad renovable, que ofrecen un impacto ambiental mínimo y cumplen con los requisitos de sostenibilidad a largo plazo. Los biocombustibles, aunque útiles en el corto plazo, deben evolucionar hacia alternativas que preserven tanto la integridad de los ecosistemas como los recursos del planeta.

2.1.1 COMBUSTIBLES FÓSILES: LIMITACIONES Y RETOS AMBIENTALES

Durante más de un siglo, la gasolina y el diésel han sustentado la movilidad global debido a su alta densidad energética y a una infraestructura de distribución consolidada. Un solo tanque de combustible permite recorrer largas distancias, lo cual ha sido determinante para el transporte de mercancías y personas, especialmente en regiones con baja electrificación. Como estamos analizando los combustibles en usos relacionados con la movilidad estudiemos las densidades energéticas.

Combustible	Densidad Energética por Masa (MJ/kg)	Densidad Energética por Volumen (MJ/L)	Fuente
-------------	--------------------------------------	--	--------

Gasolina	46	34	DOE (Department of Energy)
Diésel	45.6	38.6	DOE (Department of Energy)
Gas Natural Comprimido	53	9.1	International Gas Union
Gas Licuado de Petróleo (GLP)	46	26	International Gas Union
Hidrógeno	120	8.5	DOE (Hydrogen and Fuel Cells)
Carbón	24	50,38	IEA (International Energy Agency)
Etanol	29.7	23.4	USDA (United States Department of Agriculture)
Biodiésel	37.8	33.3	NREL (National Renewable Energy Laboratory)
Madera (Seca)	15	-	FAO (Food and Agriculture Organization)
Uranio (Fisión nuclear)	~80,000,000	-	IAEA (International Atomic Energy Agency)

Los motores diésel destacan por su eficiencia, ofreciendo hasta un 30% más de autonomía que los de gasolina, lo que los convierte en una opción preferida para aplicaciones intensivas como el

transporte pesado o la maquinaria agrícola. Además, su fiabilidad en condiciones extremas y los bajos costes iniciales de esta tecnología explican su persistencia frente a alternativas emergentes.

No obstante, estas ventajas también representan una barrera para la transición energética. La dependencia de una infraestructura fósil y la madurez tecnológica de estos motores dificultan el cambio hacia modelos más sostenibles. Este dilema subraya la necesidad de políticas que incentiven tecnologías limpias sin desatender la viabilidad operativa, especialmente en sectores donde la electrificación aún presenta desafíos.

2.1.2 GAS NATURAL COMPRIMIDO (GNC): OPCIONES DE TRANSICIÓN

El gas natural comprimido (GNC) se presenta como una alternativa más sostenible al petróleo, especialmente en aplicaciones de transporte, gracias a sus características que lo hacen más limpio y eficiente. En primer lugar, el GNC genera menos emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales en comparación con los combustibles derivados del petróleo, como la gasolina y el diésel. Su combustión produce aproximadamente un 20-30% menos de dióxido de carbono (CO₂) y cantidades significativamente menores de óxidos de nitrógeno (NO_x), además de prácticamente eliminar las emisiones de partículas finas, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire.

Otra ventaja clave del GNC es su eficiencia en motores. Gracias a su mayor índice de octanaje, el gas natural permite una combustión más controlada y limpia, lo que no solo reduce el consumo de combustible, sino que también prolonga la vida útil de los motores al minimizar el desgaste. Además, su extracción y distribución tienen un impacto ambiental menor en comparación con el petróleo. El transporte del gas natural se realiza principalmente a través de gasoductos, reduciendo los riesgos de derrames o accidentes asociados al transporte de crudo.

El GNC también es un recurso abundante y disponible en muchas regiones del mundo. Aunque sigue siendo un combustible fósil, su uso puede ser complementado con biogás, un combustible renovable producido a partir de residuos orgánicos. Esta capacidad de mezclarse con biometano

lo convierte en una solución de transición hacia combustibles más sostenibles y, dependiendo de su origen, casi neutros en carbono.

Desde una perspectiva económica, el GNC es más asequible que los combustibles derivados del petróleo, tanto en términos de precio por unidad de energía como de costes operativos, lo que lo hace especialmente atractivo para flotas comerciales y transporte público.

2.1.3 BIOCOMBUSTIBLES: VIABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD

Los biocombustibles han surgido como una alternativa renovable y más sostenible frente a los combustibles fósiles, especialmente en el sector transporte. Producidos a partir de materias primas como cultivos agrícolas (maíz, caña de azúcar, soja), residuos orgánicos y aceites vegetales, ofrecen una solución viable para reducir la dependencia de recursos finitos como el petróleo y el carbón.

Una de las principales ventajas de los biocombustibles es su capacidad de regenerarse en ciclos cortos, al provenir de fuentes renovables. Además, el carbono emitido durante su combustión forma parte del ciclo de carbono actual, ya que proviene de plantas que previamente capturaron dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera durante su crecimiento. Este balance de carbono más equilibrado puede reducir significativamente las emisiones netas de CO₂ en comparación con los combustibles fósiles.

Los biocombustibles también destacan por su flexibilidad. Pueden mezclarse con combustibles tradicionales, como la gasolina o el diésel, sin requerir modificaciones sustanciales en los motores existentes. Por ejemplo, el bioetanol se utiliza en mezclas con gasolina para reducir su impacto ambiental, mientras que el biodiésel puede reemplazar parcialmente al diésel convencional en motores diésel estándar. Además, los biocombustibles son especialmente relevantes en sectores donde otras tecnologías, como la electrificación, son limitadas, como la aviación y el transporte marítimo.

No obstante, el uso de biocombustibles plantea desafíos significativos. La producción intensiva de cultivos para biocombustibles puede competir con la producción de alimentos y generar presión sobre los recursos naturales, como el agua y el suelo. Aunque emiten menos gases contaminantes que los combustibles fósiles, su combustión sigue contribuyendo a la contaminación del aire, lo que limita su sostenibilidad a largo plazo.

2.1.4 HIDRÓGENO VERDE: POTENCIAL Y DESAFÍOS

El hidrógeno, conocido como el "combustible del futuro", se ha posicionado como una de las soluciones más prometedoras para la transición energética hacia un sistema más sostenible. Su capacidad para combustionar y producir únicamente vapor de agua como subproducto lo convierte en una opción atractiva para descarbonizar sectores como el transporte, la industria pesada y la generación de energía. Aunque el hidrógeno es uno de los elementos más abundantes en la Tierra, no se encuentra en estado puro en grandes cantidades, lo que hace necesaria su producción mediante procesos industriales.

Una de las formas más comunes de obtener hidrógeno es mediante electrólisis, un proceso que utiliza electricidad para dividir las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, no todo el hidrógeno es igual; su sostenibilidad depende del origen de la energía empleada para su producción. Este aspecto se refleja en los distintos "colores" que se utilizan para clasificar el hidrógeno. El hidrógeno verde, por ejemplo, se produce mediante electrólisis utilizando electricidad de fuentes renovables, como solar o eólica, siendo la forma más sostenible al tener emisiones de carbono prácticamente nulas. El hidrógeno gris, en cambio, se genera a partir de gas natural sin captura de carbono, lo que lo convierte en la forma más común pero con un alto impacto ambiental. El hidrógeno azul, similar al gris, incluye captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de CO₂. También existen variantes como el hidrógeno rosa, producido mediante electrólisis con energía nuclear, y el hidrógeno turquesa, generado mediante pirólisis del metano, ambas tecnologías emergentes.

El hidrógeno ofrece múltiples ventajas que lo posicionan como un componente esencial en la transición energética. Entre ellas, destaca su capacidad de producir emisiones cero en su uso final, generando únicamente vapor de agua como subproducto. Además, es un excelente medio para almacenar energía renovable, permitiendo gestionar el excedente de electricidad generada por fuentes solares y eólicas, estabilizar redes eléctricas y garantizar el suministro en períodos de baja generación. Su versatilidad le permite ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones, desde vehículos eléctricos de pila de combustible hasta la generación de calor para procesos industriales. Por otro lado, en ciertos casos, el hidrógeno puede mezclarse con gas natural en redes ya instaladas, reduciendo las emisiones de CO₂ sin necesidad de reemplazar toda la infraestructura. Finalmente, su abundancia como materia prima, al derivar del agua, lo hace accesible en la mayoría de las regiones del mundo.

Sin embargo, el hidrógeno enfrenta desafíos significativos que limitan su adopción masiva. Uno de los principales es el alto coste de producción, especialmente en el caso del hidrógeno verde, ya que la electrólisis sigue siendo más costosa que los métodos basados en combustibles fósiles. Además, la infraestructura necesaria para su transporte, almacenamiento y distribución es limitada y requiere inversiones sustanciales. Otro desafío es la eficiencia energética; los procesos de producción, transporte y conversión del hidrógeno implican pérdidas significativas de energía, reduciendo su efectividad global. Finalmente, su naturaleza inflamable exige estrictas medidas de seguridad durante su almacenamiento y manejo.

El hidrógeno tiene el potencial de desempeñar un papel central en la transición hacia un sistema energético más sostenible, gracias a su capacidad para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como el transporte marítimo, la aviación y la industria pesada. Sin embargo, para que alcance su máximo potencial, será fundamental superar los desafíos técnicos y económicos que enfrenta actualmente. Reducir los costes de producción, desarrollar infraestructuras específicas y fomentar la integración de fuentes renovables en su generación serán pasos clave. Como vector energético, el hidrógeno no solo complementa otras tecnologías limpias, sino que también representa una solución esencial para un futuro energético equilibrado, sostenible y resiliente.

COMPARACIÓN DE COMBUSTIBLES

Tabla 1/comparativa por características de combustible

Categoría	Variable	Unidad	Gasolina	Diésel	GNV	Electricidad (Batería Litio)	Hidrogeno (Pila Combustible)
Técnica	Densidad energética (gravimétrica)	MJ/kg	46.4	45.4	53.6	0.9 (250 Wh/kg)	120
	Densidad energética (volumétrica)	MJ/L	34.8	38.6	9	0.9 (250 Wh/L)	5-10 (a 350-700 bar)
	Rendimiento del sistema	%	~30-35	~35-40	~25-30	>90	~60
	Autonomía promedio	km	600-800	800-1000	300-500	300-500	500-700
	Tiempo de recarga/repostaje	min	~5	~5	~5	30-60 (carga rápida)	~5
	Peso sistema de propulsión	kg	Bajo	Medio	Medio	Alto	Medio
	Vida útil del sistema	años / km	10-15 / 200.000	15-20 / 500.000	15-20 / 500.000	8-10 / 150-200.000	10-15 / 300-500.000

	Sensibilidad a temperatura	Cualitativo	Baja	Baja	Media	Alta	Media
	Seguridad operacional	Cualitativo	Media	Media	Media	Alta	Media
Económica	Coste por unidad de energía	USD/kWh	0.10	0.09	0.06	0.15	0.50
	Coste por km recorrido	USD/km	0.12-0.15	0.10-0.12	0.08-0.10	0.03-0.05	0.10-0.15
	Coste total de propiedad (TCO)	USD/5 años	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Alto
	Valor residual	Cualitativo	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo
	Dependencia de materias primas	Cualitativo	Alta	Alta	Media	Alta	Alta
Ambiental y Social	Emisiones CO2 por km	g/km	155.77	163.45	130	0-50	~20
	Emisiones ciclo de vida	gCO2eq/km	>200	>180	~130	50-100	20-100
	Uso de agua en producción	L/MJ	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
	Impacto ambiental de residuos	Cualitativo	Medio	Medio	Bajo	Alto	Medio

	Empleo en cadena de valor	Cualitativo	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto
Estratégico - Geopolítico	Concentración geográfica del suministro	Cualitativo	Alta	Alta	Media	Alta	Media
	Dependencia energética externa	Cualitativo	Alta	Alta	Media	Baja	Baja
	Capacidad de producción local	Cualitativo	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
	Riesgo regulatorio futuro	Cualitativo	Alto	Alto	Medio	Bajo	Bajo
	Madurez regulatoria	Cualitativo	Alta	Alta	Media	Alta	

Capítulo 3. POR QUÉ BATERÍAS

La eficiencia energética es un factor crucial que la humanidad ha estado perfeccionando desde la invención de la máquina de vapor. Hoy, la sociedad se encuentra en un proceso acelerado para lograr un aumento sin precedentes en la eficiencia energética global.

La descarbonización no solo es relevante por su impacto en la reducción de gases de efecto invernadero, sino también por sus beneficios en eficiencia energética. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), si se logra la electrificación de sectores clave como el transporte, la industria y la calefacción, la demanda de energía primaria podría reducirse hasta en un 30%. Esto se debe a las pérdidas de eficiencia que presentan los motores de combustión interna en comparación con los motores eléctricos, que pueden llegar a ser hasta 3 veces más eficientes.

Además, el uso de baterías facilita la integración de energías renovables, ya que elimina la necesidad de depender de los hidrocarburos. A medida que la capacidad de almacenamiento de energía crezca, el consumo de carbón y otros combustibles fósiles disminuirá, impulsado por las regulaciones ambientales que promueven una transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

La electrificación de sectores clave como el transporte y la industria será uno de los mayores desafíos en los próximos años. A este reto se suma otro problema relacionado con la creciente desconexión entre la oferta y la demanda de energía eléctrica, lo que podría generar una sobrecarga en las redes eléctricas. Se espera que las baterías jueguen un papel crucial para abordar estas cuestiones.

UN MERCADO EN AUMENTO

A simple vista, la presión sobre la demanda de baterías, derivada de estos sectores, parece enorme. Por ello, es importante analizar en detalle el impacto de cada uno de ellos.

El sector del transporte representa aproximadamente el 10% del PIB global ([1]), y alrededor del 25% del consumo energético mundial ([2]). Es el tercer sector más grande, junto con la agricultura, por lo que su electrificación incrementará de manera significativa la demanda de baterías. Por otro lado, el sector industrial representa cerca del 30% del PIB global ([3]). Su electrificación supone otro factor crucial en la presión sobre el desarrollo y la compra de baterías, debido a su gran consumo de energía.

Las proyecciones futuras de la demanda están estrechamente vinculadas a las regulaciones propuestas por los estados. La mayoría de los gobiernos han adoptado metas alineadas con el Acuerdo de París, que establece como objetivo limitar el aumento de la temperatura global a un máximo de 2 °C respecto a los niveles preindustriales, con esfuerzos adicionales para restringirlo a 1,5 °C.

Alcanzar estos objetivos implica un futuro de emisiones netas cero, seguido eventualmente por emisiones negativas. El camino hacia este desafío de gran escala pasa principalmente por la descarbonización de los combustibles. Este proceso es crucial para sectores altamente intensivos en energía, como la industria automovilística y la industria energética, que han sido históricamente dominantes y representan los principales impulsores de la creciente demanda de baterías.

La transición energética ya está en marcha en numerosos países. En España, por ejemplo, se han registrado días con un consumo eléctrico basado exclusivamente en fuentes renovables, lo que subraya el progreso hacia la sostenibilidad. Sin embargo, las baterías desempeñan un papel central en esta transición, ya que permiten abordar una de las principales limitaciones de las energías renovables: su naturaleza intermitente. A diferencia de los combustibles fósiles, la generación renovable es irregular y depende de factores ambientales. Hasta la fecha, la única tecnología renovable que permite el almacenamiento energético a gran escala, aunque no en forma eléctrica, es la hidráulica de bombeo. Las fuentes renovables son también las que dotan a nuestra red eléctrica de una menor inercia, lo que resulta en posibilidad de desbalance. Problemas del apagón español del 2025 son debido a que las renovables ajustan su frecuencia a la red, no como otras

fuentes como la nuclear que al producir energía a 50Hz, obligan al resto de elementos conectados a la malla a estar a esa frecuencia. Una Smart grid con uso de baterías es capaz de solucionar problemas como esto y aportar resiliencia a la red española.

Pese a la exploración de nuevas tecnologías de almacenamiento energético, las baterías son actualmente la solución más eficiente, con la respuesta más instantánea y viable. Su importancia se magnifica en el contexto de la creciente adopción de energías renovables, donde la demanda eléctrica varía entre horas pico y horas valle. Dado que no es posible controlar fenómenos como el viento o la radiación solar para ajustarlos a estas fluctuaciones, las baterías resultan imprescindibles. Estas no solo garantizan la estabilidad de la red y optimizan el aprovechamiento de la energía renovable, sino que también contribuyen a su rentabilización en mercados eléctricos como el Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE), donde las renovables, al tener bajos costes marginales, suelen ser despachadas en primer lugar.

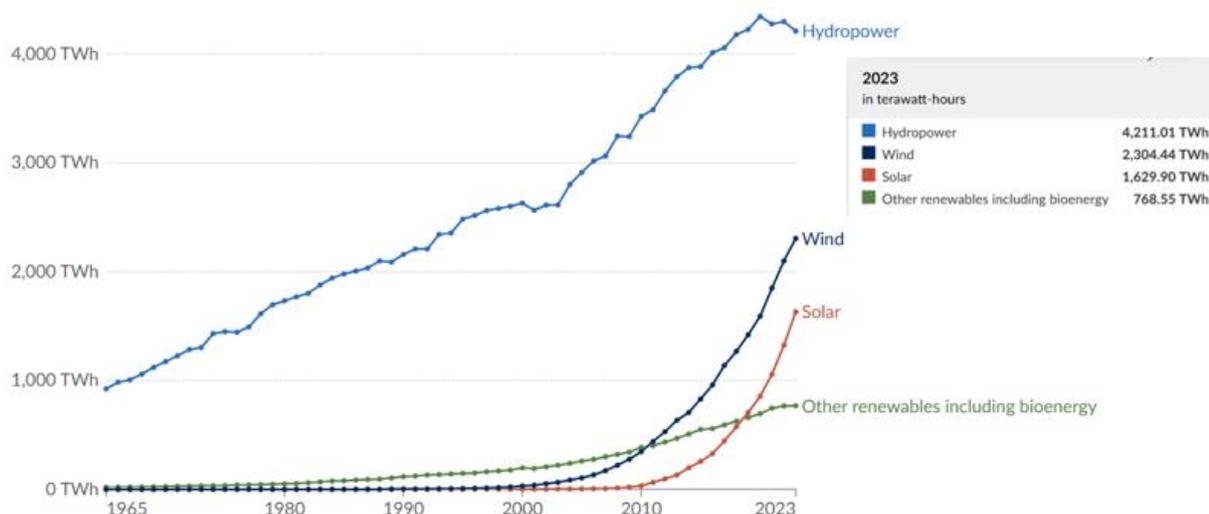


Ilustración 4/Aumento de la producción renovable

La gráfica muestra una tendencia clara de crecimiento exponencial en las fuentes renovables, especialmente en la energía solar y eólica, que han experimentado un desarrollo acelerado desde

el inicio del siglo XXI. Este comportamiento refleja el papel cada vez más predominante de estas tecnologías en la transición energética global.

En contraste, la hidroeléctrica, aunque sigue siendo la mayor fuente renovable, muestra un crecimiento más moderado y estable, indicando que su potencial de expansión futura podría estar limitado por factores geográficos y ambientales.

Por su parte, las otras fuentes renovables, incluyendo la bioenergía, presentan un crecimiento más lento en comparación con la solar y la eólica, pero contribuyen de manera constante a la diversificación de la matriz energética.

En conjunto, la gráfica refuerza la idea de que la solar y la eólica liderarán la expansión de las energías renovables en las próximas décadas, consolidando su rol como pilares clave en el suministro de energía sostenible a nivel global.

La evolución del transporte está orientada hacia la descarbonización, impulsada por avances tecnológicos y regulaciones más estrictas. Las baterías, especialmente las de iones de litio, son esenciales en esta transición, permitiendo la electrificación masiva de vehículos terrestres como automóviles, autobuses y camiones. Además, tecnologías emergentes como las baterías de estado sólido están abriendo oportunidades para la electrificación de trayectos marítimos cortos y vuelos regionales.

El desarrollo de infraestructuras de carga, junto con estrategias de economía circular, como el reciclaje de materiales críticos y la reutilización de baterías, refuerzan su viabilidad. A medida que la generación eléctrica se alinea con fuentes renovables, las baterías consolidan su rol central en la movilidad sostenible, marcando el camino hacia un transporte libre de emisiones.

¿QUÉ RECLAMA LA DEMANDA? (NECESIDADES ELÉCTRICAS DE LA MOVILIDAD)

El transporte se clasifica según el medio en el que opera: marino, aeronáutico y terrestre. De estos, el sector terrestre ha sido el primero en avanzar significativamente hacia la electrificación. Este progreso se debe, en gran parte, a factores como la infraestructura existente y la menor exigencia de peso en comparación con otros sectores.

En el ámbito aeronáutico, el peso sigue siendo un desafío importante. Las baterías disponibles no cumplen con las exigencias de densidad energética necesarias para el transporte aéreo de pasajeros y mercancías, lo que limita la electrificación en este sector. En el caso del transporte marino, las distancias largas requieren baterías de gran tamaño, lo que también representa un reto considerable en términos de autonomía y practicidad.

Aunque dentro del sector automovilístico el camino hacia la electrificación también ha sido desafiante, los consumidores continúan exigiendo una mayor autonomía en los vehículos eléctricos. Además, la falta de una infraestructura de recarga adecuada ha dificultado aún más la adopción generalizada de estos vehículos.

Con esto en mente, es esencial analizar las necesidades específicas de cada tipo de transporte en cuanto a las baterías necesarias para su funcionamiento, considerando tanto los requerimientos técnicos como las restricciones operativas de cada sector.

3.1.1 TRANSPORTE TERRESTRE: NECESIDADES ESPECÍFICAS DE BATERÍA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El transporte terrestre ha sido el sector pionero en la adopción de la electrificación gracias a la infraestructura de recarga cada vez más disponible, y a los avances continuos en la tecnología de baterías. Aunque la electrificación en este sector se encuentra más avanzada que en otros, los vehículos eléctricos terrestres aún enfrentan desafíos específicos dependiendo de su tamaño, uso y propósito.

Vehículos ligeros, como patinetes y bicicletas eléctricas, requieren baterías pequeñas y livianas que puedan ofrecer una autonomía adecuada para viajes cortos. En estos casos, la densidad energética no necesita ser tan alta como en los vehículos más grandes, pero la velocidad de recarga y la baja potencia de arranque son cruciales para su adopción masiva.

Motos eléctricas, coches y camiones eléctricos, por otro lado, requieren baterías más grandes que puedan soportar una mayor capacidad de carga, autonomía extendida y una potencia de arranque mucho mayor para cubrir distancias más largas y transportar cargas pesadas. Esto exige baterías con alta densidad energética y alta densidad de potencia, además de un sistema de recarga más rápido.

Desafíos adicionales incluyen la necesidad de infraestructura de recarga adecuada, especialmente para vehículos grandes como los camiones eléctricos. Las recargas rápidas y la conveniencia de acceso a las estaciones de recarga se vuelven cruciales para mejorar la viabilidad de estos vehículos.

Transporte por tierra: Incluye vehículos como patinetes, bicicletas, motos, coches y camiones. Cada uno de estos vehículos tiene unas necesidades algo distintas por lo que resulta sencillo representarlo en una tabla.



Vehículo	Potencia de arranque / Aceleración	Tipo de batería	Carga útil / Capacidad de transporte	Infraestructura de recarga	Coste estimado de la batería	Mantenimiento de la batería	Link de Información
Patinete	Baja potencia	Li-ion, LiFePO4	Baja capacidad de carga	Carga doméstica o estaciones públicas pequeñas	Bajo	Bajo, sustitución cada 2-3 años	DirectIndustry e-Magazine
Bicicleta	Moderada potencia	Li-ion	Baja capacidad, ligero	Carga doméstica, estaciones pequeñas	Moderado	Bajo, sustitución cada 2-3 años	Fortune Business Insights
Moto eléctrica	Alta potencia	Li-ion, LiFePO4	Moderada carga útil	Estaciones de carga rápida	Alto	Moderado, sustitución cada 3-5 años	Industry.com - Battery Market Trends
Coche eléctrico	Alta potencia	Li-ion, estado sólido	Alta carga útil	Estaciones de carga rápida, carga doméstica	Alto	Alto, reemplazo cada 5-7 años	Kearney - Sustainability
Camión eléctrico	Muy alta potencia	Li-ion, estado sólido	Gran capacidad de carga	Estaciones de carga rápida especializadas	Muy alto	Alto, reemplazo cada 5-8 años	DirectIndustry e-Magazine

Tabla 2/ características de demanda de vehículos terrestres

3.1.1.1 Características de la Batería

Es fundamental comprender cómo cada dispositivo que demanda energía (ya sean vehículos o herramientas, móviles o portátiles) requiere una solución específica en cuanto a tensión e intensidad, lo que repercute en el diseño de la batería y la forma en que se conecta y regula la energía.

En sistemas como el de un coche, se utiliza habitualmente una batería de 12 V. Durante el funcionamiento, el alternador, controlado por un regulador, eleva la tensión a aproximadamente 13,8–14 V para recargar la batería y alimentar el sistema. El motor de arranque demanda picos de corriente muy altos, que pueden alcanzar entre 200 A y 400 A en cortos períodos, mientras que el resto del sistema eléctrico alimenta numerosos componentes que requieren estabilidad en el suministro. La conexión en paralelo dentro del sistema permite que todos los elementos reciban el mismo voltaje, y el diseño robusto de la batería y el sistema de carga aseguran que se pueda suministrar la alta corriente necesaria durante el arranque.

En contraste, una moto también emplea una batería de 12 V y un sistema de carga similar que mantiene la tensión en torno a 13,8–14 V. Sin embargo, el motor de arranque de una moto, debido a su menor tamaño y número de componentes, demandas corrientes considerablemente inferiores, generalmente entre 50 A y 100 A. La arquitectura del sistema sigue una lógica similar, con la batería conectada en paralelo para asegurar una distribución uniforme del voltaje.

Para dispositivos de movilidad eléctrica de menor escala, como las bicicletas y patinetes eléctricos, se opta por utilizar packs de baterías con voltajes más altos (generalmente entre 36 V y 52 V). El uso de un mayor voltaje permite obtener la potencia necesaria sin recurrir a corrientes excesivamente altas. Por ejemplo, en una bicicleta eléctrica de 250 W con un sistema de 36 V, la corriente nominal ronda los 7 A, aunque motores más potentes pueden requerir entre 10 y 15 A. En estos sistemas, las celdas se conectan en serie para alcanzar el voltaje requerido y en paralelo para incrementar la capacidad y la corriente máxima disponible. Un controlador de motor, que emplea técnicas como la modulación por ancho de pulso (PWM), se encarga de ajustar la tensión efectiva y limitar la corriente según la demanda, mientras que un sistema de gestión de baterías (BMS) protege las celdas y asegura un rendimiento óptimo.

En el caso de las herramientas eléctricas portátiles, como los taladros, las baterías suelen tener tensiones nominales de 12, 18 o 20 V. Estas baterías se diseñan con celdas conectadas en serie para alcanzar el voltaje deseado, y en ocasiones se utilizan conexiones en paralelo para aumentar

la capacidad. Aunque la corriente en operación continua es moderada—normalmente unos pocos amperios—los picos durante el arranque o bajo cargas intensas pueden ser significativos. Los sistemas integrados de gestión de baterías en estos dispositivos aseguran que se prevengan sobrecargas y descargas profundas, lo que resulta crucial para la seguridad y la longevidad de la batería.

En definitiva, el diseño de cada sistema depende de la correcta combinación de conexiones en serie (para sumar voltajes) y en paralelo (para aumentar la capacidad y la corriente) junto con el uso de controladores electrónicos y sistemas de gestión (BMS). Mientras que coches y motos requieren soluciones capaces de soportar altos picos de corriente para el arranque y una gran cantidad de componentes, las bicicletas y patinetes eléctricos buscan una mayor eficiencia mediante el uso de voltajes más altos y corrientes moderadas, y las herramientas portátiles necesitan equilibrar el voltaje y la capacidad para satisfacer demandas intensivas en periodos breves. Esta integración y adaptación de la fuente de energía a las necesidades específicas de cada dispositivo es fundamental para garantizar un funcionamiento óptimo, eficiente y seguro, constituyendo un pilar esencial en el diseño de sistemas eléctricos en la práctica actual.

Elemento	Voltaje Nominal del Sistema	Demanda de Corriente	Configuración y Regulación	Observaciones
Coche	12 V (batería); 13,8–14 V en marcha (alternador)	Picos de 200–400 A (motor de arranque)	La batería se conecta en paralelo con el resto del sistema. El alternador y el regulador mantienen la tensión y permiten suministrar altos picos de corriente.	Sistema robusto que alimenta múltiples componentes y soporta demandas muy altas durante el arranque.

Moto	12 V (batería); 13,8–14 V en marcha	Picos de 50–100 A (motor de arranque)	Conexión en paralelo similar a la del coche, adaptada a una menor demanda global.	Demanda general inferior a la de un coche, con menos componentes eléctricos y picos de corriente más bajos.
Bicicleta Eléctrica	36–52 V	Nominal: ~7 A (por ejemplo, en un motor de 250 W); 10–15 A en sistemas de mayor potencia	Las celdas se conectan en serie para alcanzar el voltaje deseado y en paralelo para aumentar la capacidad. Se usa un controlador PWM y un BMS para la gestión.	Se utiliza un mayor voltaje para obtener la potencia necesaria sin recurrir a corrientes excesivas, optimizando la eficiencia.
	36–48 V	Aproximadamente 7 A nominal, con picos en aceleración	Configuración similar a la bicicleta eléctrica (serie para voltaje y paralelo para capacidad). Se emplea un controlador PWM y BMS para regular la energía.	Diseñado para movilidad urbana, con demandas intermedias en cuanto a potencia y eficiencia.
Herramientas (Taladro)	12, 18 o 20 V (ejemplo: 18 V formado por 5 celdas de 3,6 V)	Continuo: 2–5 A, con picos más elevados durante arranques o carga máxima	Las celdas se conectan en serie para lograr el voltaje, y en ocasiones en paralelo para aumentar la capacidad. Integran un BMS para protección.	Enfocadas en portabilidad y uso intensivo durante cortos periodos, con alta demanda transitoria de corriente.

3.1.2 AVIACIÓN ELÉCTRICA: DESAFÍOS Y AVANCES EN LAS NECESIDADES DE BATERÍAS

La aviación eléctrica ha comenzado a despegar como una solución prometedora para la movilidad urbana y las distancias regionales. Sin embargo, este avance está aún en sus primeras etapas. Los aviones eléctricos pequeños y regionales están demostrando ser viables para trayectos de corta distancia, mientras que los aviones comerciales de largo alcance siguen dependiendo de combustibles tradicionales debido a las limitaciones tecnológicas actuales de las baterías. Una de las innovaciones más emocionantes en este campo son los aerotaxis, que podrían transformar la movilidad urbana.

Aviones pequeños eléctricos:

Los aviones pequeños eléctricos están destinados principalmente a vuelos de corta distancia o transporte urbano. Si bien tienen un gran potencial de adopción para trayectos urbanos, el desafío sigue siendo la autonomía de las baterías disponibles. Las baterías de alta densidad energética son cruciales para estos aviones, que necesitan suficiente potencia de despegue sin comprometer la capacidad de ofrecer una autonomía viable en distancias cortas. A pesar de los avances, el peso de las baterías sigue siendo un reto importante.

Aviones regionales eléctricos:

Los aviones regionales eléctricos deben cubrir trayectos más largos y, por lo tanto, requieren baterías con mayor capacidad. Las baterías de estado sólido están siendo exploradas debido a su capacidad para ofrecer mayor densidad energética y mejor tiempo de recarga en comparación con las baterías tradicionales. Sin embargo, la infraestructura de recarga debe evolucionar rápidamente para dar cabida a estos nuevos aviones, especialmente en aeropuertos pequeños y medianos, que necesitan estaciones de recarga ultrarrápidas para hacer que estos aviones sean operativos y rentables.

Aviones comerciales eléctricos:

Para los aviones comerciales de largo alcance, la electrificación sigue siendo un reto debido a las limitaciones de autonomía. Las baterías actuales no son lo suficientemente densas en energía para competir con los combustibles fósiles en vuelos de larga distancia. Se está investigando el uso de hidrógeno como alternativa para ofrecer una mayor autonomía y potencia de despegue, pero las infraestructuras necesarias para estos combustibles alternativos también están en una etapa incipiente. Los aeropuertos internacionales deben adaptarse para ofrecer recarga rápida y sistemas de abastecimiento de hidrógeno, lo que implica un importante desafío logístico y de inversión.

Aerotaxis eléctricos:

Los aerotaxis eléctricos representan una de las aplicaciones más innovadoras y emocionantes de la aviación eléctrica. Estos vehículos están diseñados para ser una solución de movilidad aérea urbana (UAM) que conectará zonas urbanas densas a través de vuelos de corta distancia. Los aerotaxis eléctricos son pequeños, ligeros y suelen tener capacidad para entre 2 y 5 pasajeros. Están diseñados para despegue y aterrizaje vertical (VTOL), lo que les permite operar desde pequeñas plataformas urbanas, sin la necesidad de grandes aeropuertos.

Los aerotaxis eléctricos tienen varias ventajas:

- Movilidad urbana eficiente, reduciendo la congestión en las ciudades.
- Emisiones cero, al ser completamente eléctricos, contribuyendo a un futuro más limpio.
- Operaciones rápidas y accesibles, ya que se espera que tengan tiempos de recarga relativamente rápidos en estaciones dedicadas.

Sin embargo, también enfrentan desafíos:

- Autonomía limitada: Aunque son adecuados para trayectos cortos (5-50 km), la autonomía sigue siendo una preocupación.
- Infraestructura de recarga: Los aerotaxis eléctricos requerirán una infraestructura de recarga ultrarrápida en zonas urbanas y techos de edificios dedicados, lo cual será necesario para hacer que este tipo de transporte sea viable a gran escala.

Vehículo Aéreo	Potencia de arranque / Aceleración	Tipo de batería	Carga útil / Capacidad de transporte	Infraestructura de recarga	Coste estimado de la batería	Mantenimiento de la batería	Link de Información
Avión pequeño eléctrico	Moderada potencia para despegue	Li-ion, LiFePO4	Baja carga útil (pasajeros limitados)	Estaciones de carga rápida en aeropuertos pequeños	Moderado	Bajo, sustitución cada 3-5 años	1. Avión pequeño eléctrico: Aviation Week
Avión regional eléctrico	Alta potencia para despegue	Li-ion, estado sólido	Moderada capacidad de carga útil	Infraestructura de recarga especializada en aeropuertos	Alto	Moderado, sustitución cada 5-7 años	2. Avión regional eléctrico: Electric Aviation
Avión comercial eléctrico	~1-2 MW (según prototipos), menor aceleración que un reactor	Baterías de iones de litio (algunos proyectos investigan estado sólido)	~9-19 pasajeros en prototipos actuales (proyectos futuros buscan +50 pasajeros)	Estaciones de carga en aeropuertos con equipos de carga rápida y sistemas de refrigeración	Entre 200 y 400 €/kWh (coste orientativo, puede variar según fabricante y tecnología)	Inspecciones regulares con monitorización de temperatura y ciclos de carga; reemplazo programado tras cierto número de ciclos	3. Avión comercial eléctrico: Flight Global
Aerotaxi eléctrico	Alta potencia para despegue	Li-ion, estado sólido	Baja carga útil (pasajeros y equipaje limitado)	Estaciones de carga rápida en zonas urbanas y aeropuertos pequeños	Moderado	Bajo, sustitución cada 2-4 años	4. Aerotaxi eléctrico: Urban Aeronautics

Tabla 3/características de vehículos aéreos

DEMANDA DE LAS BATERÍAS POR SECTOR

Uno de los principales factores que impulsan el crecimiento de estos sectores es la implementación de políticas regulatorias cada vez más estrictas, orientadas a una transición ecológica de gran escala. Este mercado en auge busca transformar profundamente dos de los sectores más grandes a nivel global.

El primero es el sector automovilístico, que está experimentando un cambio sin precedentes hacia la electrificación. Este cambio incluye no solo la sustitución de vehículos con motores de combustión interna por eléctricos, sino también la integración de tecnologías avanzadas como la conducción autónoma, que requiere sistemas de energía fiables y sostenibles. La electrificación está redefiniendo tanto los sistemas de producción como las cadenas de suministro, incrementando la demanda de baterías de alta capacidad y eficiencia.

El segundo sector es el energético, históricamente basado en combustibles fósiles desde la invención de la máquina de vapor y los motores de combustión interna para convertir energía mecánica en electricidad. Sin embargo, en la actualidad, se está produciendo un cambio hacia fuentes renovables como la energía solar, eólica y mareomotriz, como pudimos observar en el gráfico de la distribución Española de energía. Estas fuentes tienen una gran ventaja en términos de sostenibilidad, pero presentan el desafío inherente de ser intermitentes, ya que es imposible "almacenar" el viento o la luz solar directamente.

En este contexto, el almacenamiento de energía se ha convertido en un área de innovación clave. Aunque están surgiendo alternativas a las baterías, como el almacenamiento térmico o por hidrógeno, estas tecnologías aún no han alcanzado la madurez necesaria para su adopción masiva. Por el momento, las baterías representan la solución más viable para almacenar energía eléctrica generada de fuentes renovables, siendo un componente esencial para garantizar la estabilidad y eficiencia de las redes energéticas modernas.

El siguiente gráfico resume la distribución proyectada de la demanda de baterías por sector, destacando cómo los sectores del transporte eléctrico y el almacenamiento a gran escala dominan el consumo energético global, mientras que otros sectores, como la electrónica de consumo y las herramientas eléctricas, tienen un peso relativamente menor en términos de teravatios-hora (TWh).

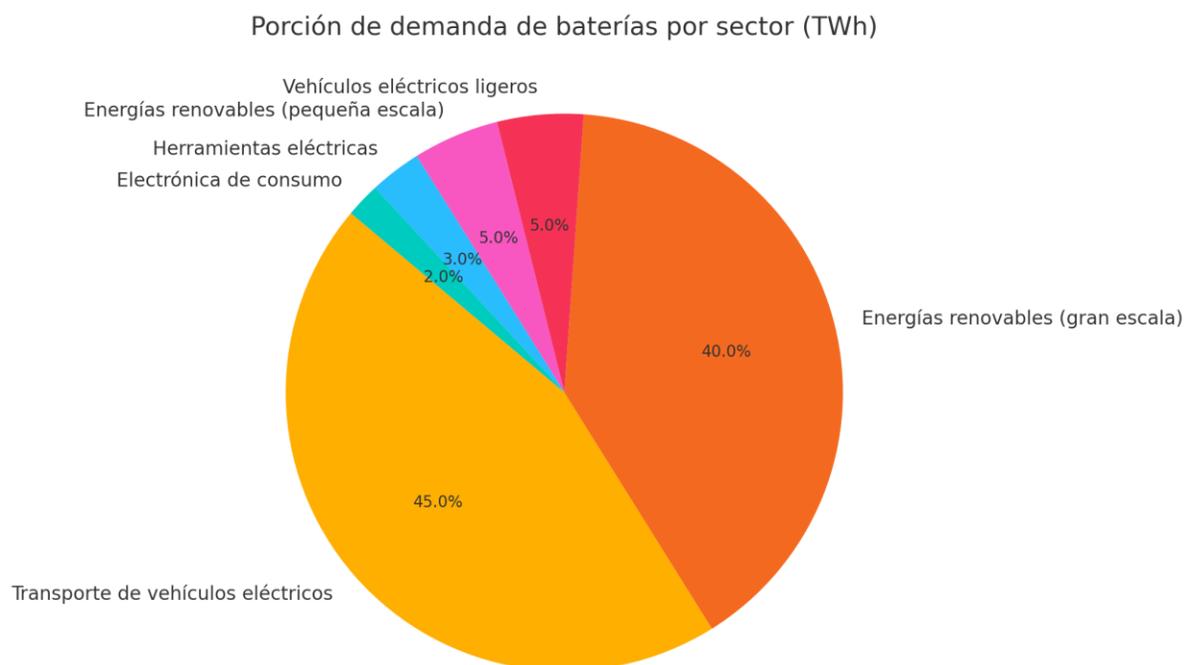


Ilustración 5/ Porción de la demanda de baterías por cada sector/ <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/battery-market/> <https://www.imarcgroup.com/report/es/battery-market>

4.2 TECNOLOGÍAS ACTUALES EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

El desarrollo de baterías avanzadas para vehículos eléctricos y otras aplicaciones tecnológicas está impulsado por la necesidad de mejorar la densidad energética, la velocidad de carga y la seguridad.

Para comenzar con el análisis de baterías quiero comenzar con uno de los mayores avances desde el su descubrimiento. Los superconductores son materiales muy usados no solo en baterías sino en muchas otras tecnologías.

La implementación de superconductores en baterías podría revolucionar el almacenamiento de energía. Al eliminar casi por completo la resistencia eléctrica, se reducen significativamente las pérdidas de potencia durante los procesos de carga y descarga, lo que permitiría cargas más rápidas y una mayor eficiencia en la transferencia de energía. Esto se traduciría en baterías con mayor densidad de energía y una vida útil prolongada gracias a la reducción del desgaste por ciclos repetitivos.

Sin embargo, el principal desafío radica en mantener las condiciones de baja temperatura necesarias para que los materiales superconductores operen de forma efectiva. Aunque los avances en superconductores de alta temperatura han permitido operar a temperaturas menos extremas que las convencionales, aún se requiere un sistema de refrigeración especializado, lo que puede incrementar los costes y la complejidad del sistema.

En resumen, las baterías superconductoras tienen el potencial de mejorar radicalmente el rendimiento y la eficiencia energética, pero su viabilidad comercial depende de superar los desafíos asociados con la refrigeración y el desarrollo de materiales superconductores que puedan operar de manera económica en aplicaciones a temperatura ambiente. Los superconductores por ende han de ser explorados, un material superconductor con capacidad para tener sus propiedades en temperaturas de trabajo supondría un completo cambio de paradigma en el mercado de baterías eléctricas.

A continuación, se presentan algunas de las tecnologías de baterías más relevantes en el mercado actual y su comparación en términos de precio, disponibilidad, desempeño y seguridad.

Batería de Plomo-Ácido: Aunque es una opción económica y ampliamente disponible, la batería de plomo-ácido presenta una baja densidad energética, lo que limita su autonomía. Su vida útil es relativamente corta, con un alto riesgo de derrame y requiere mantenimiento. A pesar de sus limitaciones, su bajo coste la hace adecuada para aplicaciones en vehículos eléctricos de bajo coste y sistemas de respaldo de energía.

Batería de Níquel-Cadmio (NiCd): Esta tecnología ofrece una larga vida útil y una carga rápida, pero su efecto memoria y los materiales tóxicos presentes la hacen menos favorable para aplicaciones modernas. Su densidad energética es moderada, y aunque la velocidad de carga es decente, su uso está disminuyendo, siendo reemplazada por baterías más eficientes como las de litio.

Batería de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH): Las baterías NiMH ofrecen una mayor densidad energética que las NiCd y son más seguras. Sin embargo, su mayor coste y la menor durabilidad en comparación con las baterías de iones de litio están limitando su uso. A pesar de esto, todavía se utilizan en aplicaciones específicas, como vehículos híbridos.

Batería de Iones de Litio (Li-ion): Las baterías de Li-ion dominan el mercado de vehículos eléctricos debido a su alta densidad energética y velocidad de carga rápida. Aunque su alto coste y el riesgo de fuga térmica siguen siendo preocupaciones, su eficiencia y bajo mantenimiento las hacen la tecnología preferida para vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos portátiles. Además, su larga vida útil y alta densidad de potencia la convierten en una opción confiable para la mayoría de las aplicaciones modernas.

Batería de Polímero de Litio (LiPo): Similar a la batería de iones de litio, las baterías LiPo son ligeras y flexibles, lo que las hace útiles en aplicaciones como drones y dispositivos electrónicos portátiles. Sin embargo, su sensibilidad a daños y el riesgo de fuga térmica limitan su uso en

algunas aplicaciones. Estas baterías permiten altas tasas de descarga y velocidades de carga rápidas, pero requieren sistemas de protección más sofisticados.

Batería de Estado Sólido: La batería de estado sólido promete ser una solución revolucionaria gracias a su mayor seguridad (sin electrolitos líquidos inflamables) y mayor densidad energética. Sin embargo, los altos costes de producción y las dificultades en la escalabilidad son desafíos importantes. A pesar de estos obstáculos, su desempeño superior a temperaturas extremas y la posibilidad de mayores tasas de carga hacen que esta tecnología sea una opción prometedora para el futuro de los vehículos eléctricos.

Batería de Sodio-Ion: Las baterías de sodio-ion son una opción más barata y más segura que las de litio, pero tienen una menor densidad energética. Aunque se encuentran en desarrollo y todavía no tienen la infraestructura necesaria para la producción a gran escala, su potencial en términos de coste y seguridad las convierte en una alternativa interesante para aplicaciones que no requieren tanta densidad energética.

Batería de Litio-Azufre (Li-S): La batería Li-S es una de las tecnologías con mayor densidad energética potencial, pero su vida útil corta y problemas de estabilidad térmica limitan su adopción en el mercado. A pesar de estas limitaciones, su ligereza y alta densidad energética la hacen un área activa de investigación para aplicaciones de alta energía.

Batería de Aluminio-Aire: Aunque la batería de aluminio-aire tiene una densidad energética extremadamente alta, es no recargable convencionalmente. A pesar de su gran capacidad para almacenar energía, esta tecnología enfrenta problemas significativos relacionados con la recarga y la infraestructura, limitando su uso a aplicaciones específicas de una sola vez.

Batería de Magnesio-Ion: Las baterías de magnesio-ion son una alternativa prometedora debido a su mayor densidad energética que las baterías de litio. Sin embargo, esta tecnología está aún en fase experimental, y su baja eficiencia y peso elevado limitan su uso para aplicaciones comerciales masivas.

Cada una de estas tecnologías presenta ventajas y desventajas que las hacen más o menos adecuadas según la aplicación específica. La elección de la batería adecuada dependerá de factores como el coste, la densidad energética, la seguridad, la vida útil y la infraestructura de recarga disponible.

En cuanto a su uso en movilidad cada una tiene sus ventajas pero principalmente su uso óptimo es el siguiente:

Para movilidad de pasajeros de alto rendimiento, la combinación de baterías de ion-litio o polímero de litio enriquecidas con ánodos de silicio se perfila como la opción más equilibrada, pues ofrece densidades energéticas superiores a 300 Wh/kg, potencias de pico en torno a 400 W/kg, recargas en menos de 20 min y más de 1 000 ciclos de vida manteniendo la seguridad bajo control de un BMS avanzado; en entornos de flotas urbanas o almacenamiento estacionario, donde prima el coste por kWh, la abundancia de materia prima y la durabilidad, las baterías de sodio-ion –con más de 2 000 ciclos y precios reducidos– son la alternativa más sensata, mientras que para aplicaciones ultraligeras como drones o UAV la ligereza y flexibilidad de las celdas LiPo sigue siendo insustituible; por su parte, los sistemas de aluminio–aire permiten diseñar “range extenders” con densidades energéticas casi cuatro veces mayores que el litio, ideales para emergencias o flotas con logística de recambio de ánodos; y aunque tecnologías emergentes como litio-azufre o magnesio-ion prometen mejoras disruptivas en energía y vida útil, su madurez aún no compite en el coche eléctrico, de modo que la verdadera revolución a medio plazo vendrá de las baterías de estado sólido, capaces de aunar las mayores densidades, cargas ultrarrápidas y seguridad intrínseca en un único paquete cuando consigan escalar económicamente.

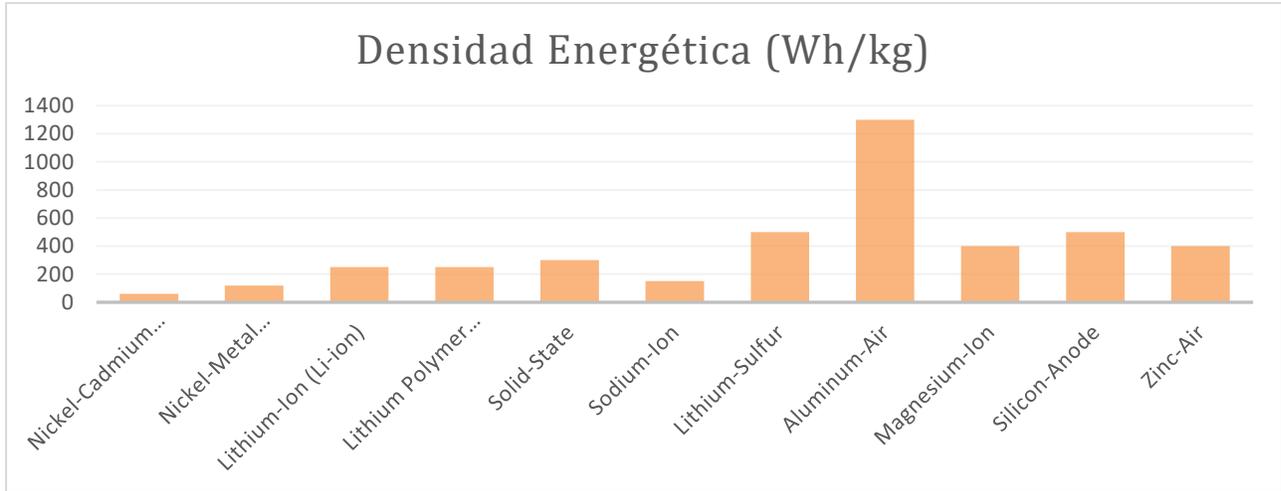


Ilustración 6/densidad energética de las distintas tecnologías

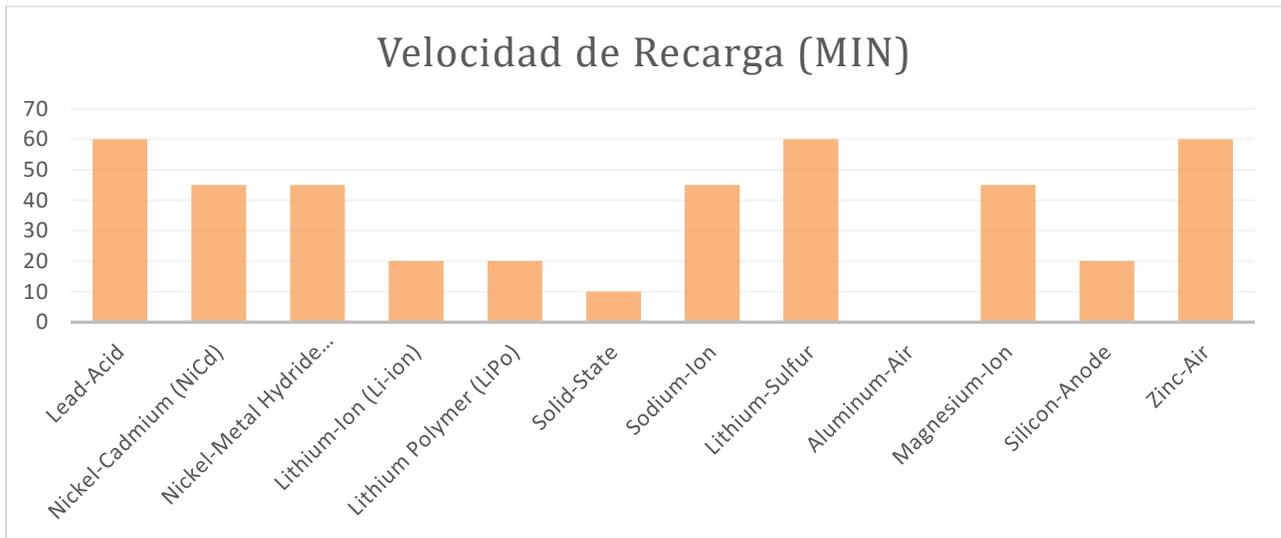


Ilustración 7/velocidad de recarga de las distintas tecnologías

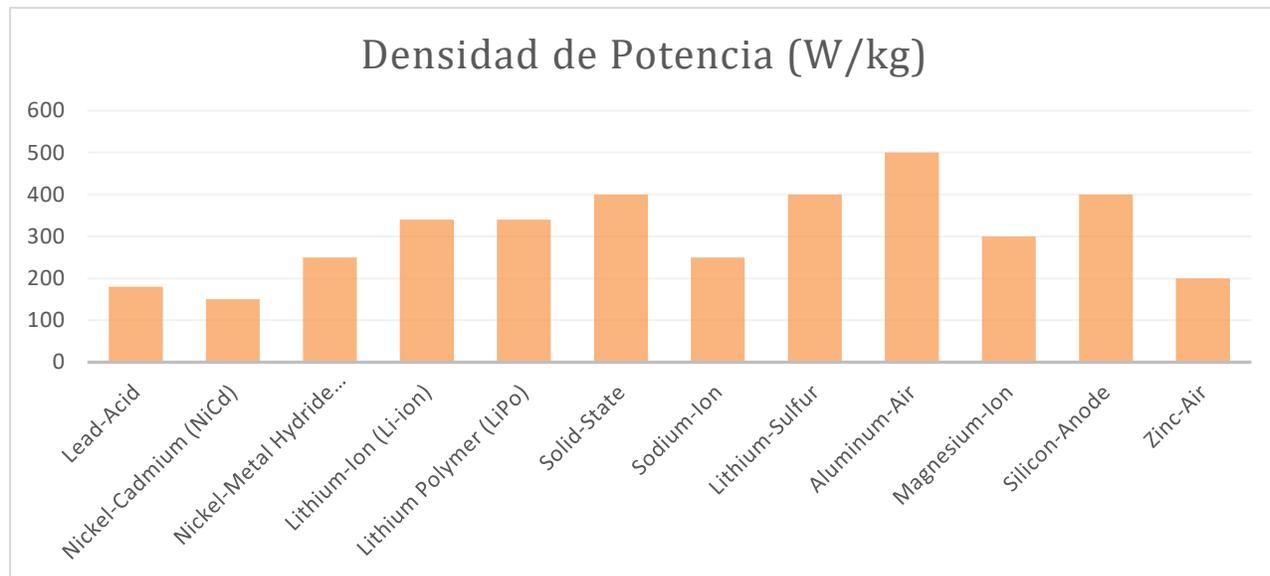


Ilustración 8/Densidad de Potencia de las distintas tecnologías



Ilustración 9/seguridad en las distintas tecnologías

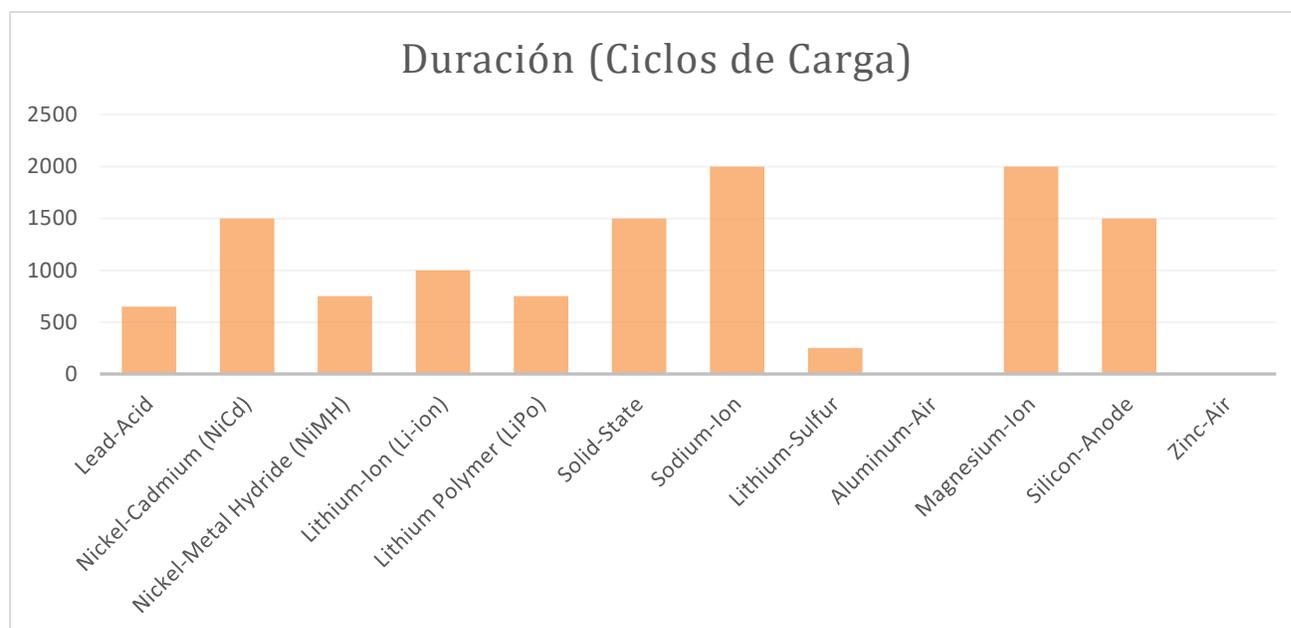


Ilustración 10/Duración de las distintas tecnologías

El mercado del almacenamiento de energía está en plena expansión, con proyecciones que anticipan un crecimiento exponencial en la próxima década. La electricidad es una fuente de energía excepcional, versátil y limpia, pero su mayor inconveniente sigue siendo la dificultad de almacenarla de manera económica y eficiente.

A diferencia de los combustibles líquidos o gaseosos, almacenar electricidad implica complejidades únicas. Guardar una corriente de electrones requiere soluciones como cables superconductores, donde el movimiento de la electricidad casi no encuentra resistencia, minimizando las pérdidas. Sin embargo, estas tecnologías son costosas y de difícil implementación. Por ello, la mayoría de los sistemas convierten la electricidad en otros tipos de energía más fáciles de almacenar, para luego revertir el proceso cuando sea necesario.

Actualmente, la electricidad se almacena de diversas maneras: como presión en sistemas de aire comprimido, como energía cinética en volantes de inercia, mediante reacciones químicas en

baterías, a través de calor en sistemas térmicos, con baterías gravitatorias o incluso transformándola en hidrógeno mediante electrólisis. Aunque estas tecnologías son útiles, no todas cumplen con los estrictos estándares que han establecido los vehículos de combustión interna en términos de densidad energética, peso, tiempo de recarga y duración.

Sin embargo, en el ámbito del almacenamiento estacionario, las posibilidades son aún más prometedoras. La combinación de almacenamiento de energía con **smart grids** no solo permite optimizar las redes eléctricas, sino que también abre la puerta a un sistema energético más eficiente, sostenible y adaptado a los retos del futuro. Esta evolución, como veremos, está transformando la manera en que producimos, distribuimos y consumimos electricidad.

Estamos entrando en una era crucial para la transformación de nuestras redes eléctricas. Las **smart grids**, o redes eléctricas inteligentes, están convirtiéndose rápidamente en el pilar de un futuro impulsado por energías renovables y una gestión energética optimizada. Las inversiones en infraestructuras de smart grids están en auge, impulsadas por los objetivos globales de descarbonización y la necesidad urgente de modernizar sistemas eléctricos obsoletos. Según proyecciones, el mercado global de smart grids superará los **103.400 millones de dólares para 2026**, un claro reflejo del ímpetu detrás de esta revolución [13].

Para que esta visión se haga realidad, será necesario vencer barreras económicas, técnicas y de seguridad: bajar los costes de sensores IoT y comunicaciones en tiempo real, garantizar la interoperabilidad con redes heredadas y blindar los datos frente a ciberataques. Sin embargo, ya se perfilan soluciones muy prometedoras: el despliegue de sistemas de almacenamiento distribuido capta el excedente renovable para devolverlo en picos de demanda; los recursos energéticos descentralizados —paneles solares domésticos y microrredes comunitarias— transforman a los consumidores en prosumidores activos; y las plataformas de inteligencia artificial afinan la predicción de cargas, optimizan el funcionamiento de los activos y reducen pérdidas hasta en un 30 %. A ello se suma la tecnología vehículo-a-red (V2G), que convierte a los coches eléctricos en baterías móviles capaces de inyectar energía de vuelta a la red. Lograr un despliegue masivo

exigirá alianzas público-privadas, marcos regulatorios claros y una inversión sostenida, especialmente en zonas con infraestructuras obsoletas, pero estos desarrollos están sentando las bases para que las smart grids reinventen por completo la forma en que producimos, distribuimos y consumimos electricidad.

Capítulo 4. CADENA DE SUMINISTRO DE LAS BATERÍAS

DE LA MINA AL MERCADO (LITIO)

La extracción de litio se lleva a cabo principalmente a partir de dos fuentes: salmueras y minerales de roca dura. En el caso de las salmueras, que representan la mayor parte de la producción global, el proceso comienza con la perforación de pozos en salares de alta concentración, como los ubicados en el Triángulo del Litio, en Sudamérica. La salmuera extraída se traslada a estanques de evaporación donde, tras un proceso que puede durar varios meses o incluso años, el litio se concentra progresivamente a medida que el agua se evapora. Durante este periodo, se eliminan impurezas como sodio, calcio y magnesio mediante distintos tratamientos químicos. Finalmente, el litio concentrado se convierte en carbonato o hidróxido de litio, dependiendo de su destino industrial. Aunque este método presenta costes relativamente bajos en comparación con la minería tradicional, su dependencia de grandes volúmenes de agua y de condiciones climáticas favorables representa un desafío significativo en términos de sostenibilidad.

Por otro lado, la minería de litio a partir de roca dura, especialmente de espodumena, se ha consolidado como una alternativa estratégica en países como Australia, Canadá y China. En este proceso, el mineral es extraído mediante técnicas de minería a cielo abierto o subterránea, seguido de una etapa de trituración para reducir el tamaño del material. Posteriormente, se somete a flotación química para separar el litio de otros minerales y se calienta a temperaturas superiores a los 1.000 grados Celsius para mejorar su reactividad. A diferencia de la extracción desde salmueras, este método no depende de condiciones climáticas ni de largos tiempos de evaporación, permitiendo una producción más rápida y predecible. Sin embargo, su principal desventaja radica en su elevado consumo energético y en el impacto ambiental derivado de la generación de residuos mineros.

Independientemente del método de extracción, el litio crudo debe pasar por un proceso de refinación antes de ser utilizado en la fabricación de baterías y otros productos industriales. Este procesamiento químico permite obtener carbonato de litio e hidróxido de litio con niveles de pureza superiores al 99.5 por ciento [1], lo que es fundamental para su aplicación en tecnologías avanzadas. La conversión del litio en sus formas comerciales se lleva a cabo a través de la precipitación química con compuestos como carbonato de sodio o hidróxido de calcio, seguido de un proceso de filtrado y cristalización para eliminar impurezas. La eficiencia de esta etapa es clave para determinar la competitividad del producto final, ya que un proceso de refinación ineficaz puede incrementar significativamente los costes y reducir la disponibilidad de litio de alta calidad.

En la actualidad, la industria del litio enfrenta múltiples desafíos tanto en términos de eficiencia como de sostenibilidad. La creciente presión ambiental ha llevado a un mayor escrutinio sobre el uso del agua en la extracción de salmueras y sobre el impacto de la minería en los ecosistemas locales. Para mitigar estos efectos, se están desarrollando nuevas tecnologías como la extracción directa de litio, que busca reducir la dependencia de la evaporación prolongada mediante procesos de filtrado y separación química más eficientes. Adicionalmente, se ha intensificado la investigación en métodos de reciclaje de baterías, lo que podría reducir la necesidad de nueva extracción en el futuro y diversificar las fuentes de suministro de litio.

IMPORTANCIA DEL LITIO

El litio es un recurso esencial en la transición energética, impulsando tecnologías como las baterías de iones de litio, clave para vehículos eléctricos y el almacenamiento de energías renovables. Su alta densidad energética y capacidad de recarga lo han convertido en un motor de innovación tecnológica y económica, atrayendo grandes inversiones y fortaleciendo industrias estratégicas.

A nivel global, países productores como Australia, Chile y China lideran su suministro, consolidándose como actores clave en el mercado. Sin embargo, la creciente dependencia de este recurso plantea desafíos significativos, como la sostenibilidad de las reservas y el impacto ambiental de su extracción. Una gestión responsable será fundamental para garantizar su papel transformador en la construcción de un futuro sostenible.

Distribución del Uso del Litio (%)

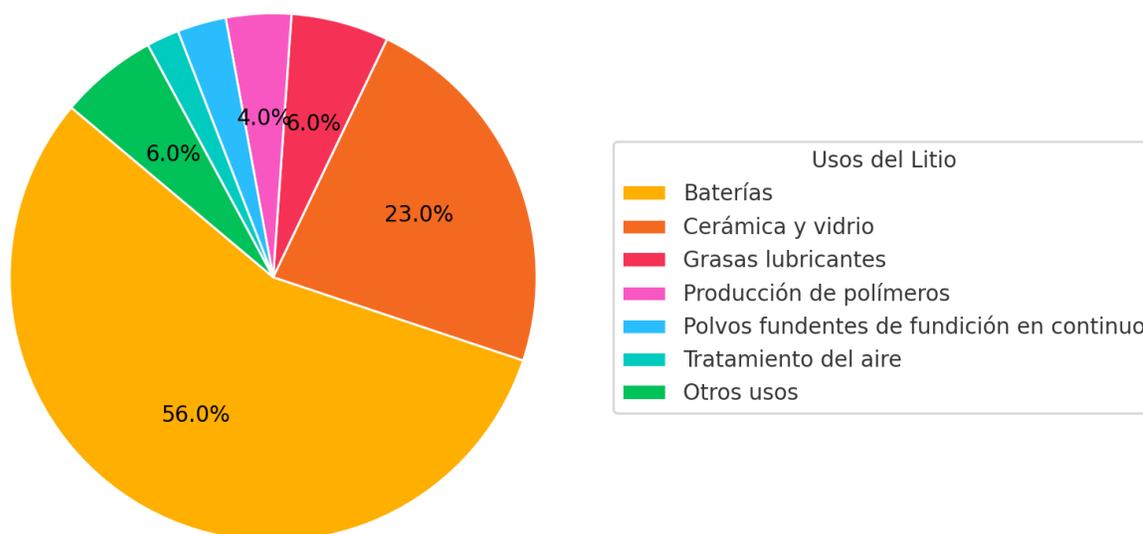


Ilustración 11/ Usos del Litio/https://

www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/624816/15Perfil_Litio_2020_T_.pdf

El litio es un recurso estratégico, con el 56% de su uso global destinado a baterías, fundamentales para vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos y almacenamiento de energías renovables. Este predominio refleja su papel clave en la transición energética y la descarbonización.

Además, el 23% se utiliza en cerámica y vidrio, mejorando su resistencia térmica y mecánica, mientras que el 6% se destina a grasas lubricantes, esenciales en aplicaciones industriales y automotrices. Usos secundarios como la producción de polímeros (4%) y otros especializados (11% combinado) destacan la versatilidad del litio.

Con más de la mitad de su demanda vinculada a baterías, el litio impulsa la innovación tecnológica y energética, siendo además un componente esencial en sectores industriales diversos.

Distribución del Mercado de Tipos de Baterías (%)



Ilustración 12/cuota de mercado de cada tipo de batería/ <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/battery-market?utm=>

El litio se ha convertido en un material clave para la transición hacia un futuro energético más sostenible, gracias a su papel predominante en la industria de las baterías. Su alta densidad energética, larga vida útil y capacidad para recargarse rápidamente lo hacen indispensable en sectores como los vehículos eléctricos, los dispositivos electrónicos y los sistemas de almacenamiento de energía renovable.

Tal como se aprecia en la gráfica, las baterías de iones de litio dominan el mercado global, representando el 37% de la participación total. Este liderazgo refleja su capacidad para satisfacer

las demandas actuales de eficiencia y sostenibilidad. Comparadas con otras tecnologías, como las baterías de plomo-ácido (29%) o las de níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico (14%), las de iones de litio se destacan por ser más livianas, seguras y de mayor rendimiento. Además, el crecimiento continuo de sectores como el transporte eléctrico y las energías renovables ha consolidado aún más su posición.

El litio, como base para estas baterías, no solo impulsa avances tecnológicos, sino que también se convierte en un recurso estratégico cuyo acceso y manejo determinarán el desarrollo de muchas industrias en los años venideros.

4.1.1 POSICIONAMIENTO DE LOS PAÍSES

La extracción de litio está altamente concentrada en unas pocas regiones del mundo, con distintos modelos de explotación, regulaciones y acceso al mercado. Este panorama define el equilibrio de poder en la cadena global de suministro de baterías y su impacto en la movilidad sostenible.

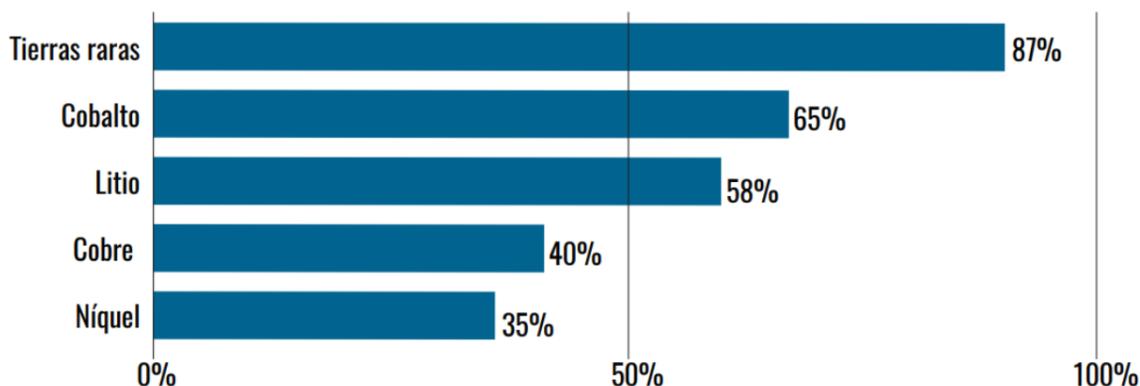
Australia es el mayor productor mundial de litio, extrayéndolo principalmente en forma de espodumena a través de minas a cielo abierto. Su producción es eficiente y estable, pero carece de infraestructura avanzada para su refinamiento. Como resultado, gran parte del litio australiano se exporta a China, reforzando la dependencia global del país asiático para el procesamiento del material. Chile, con vastos depósitos en salares, extrae litio a través de un proceso de evaporación que, si bien es altamente eficiente, plantea desafíos ambientales debido al uso intensivo de agua. El gobierno chileno regula la industria mediante concesiones, lo que limita la expansión de la explotación privada. Este control estatal ha generado debates sobre la necesidad de atraer inversión extranjera sin perder soberanía sobre este recurso estratégico.

China, aunque su producción bruta de litio es menor que la de Australia y Chile, domina la refinación, lo que lo convierte en el actor más influyente del mercado. Controla más del 60% del procesamiento de litio, lo que significa que una gran parte del litio extraído en otros países pasa

por plantas chinas antes de ser utilizado en la fabricación de baterías. Argentina, con grandes reservas de litio en salares, ha adoptado una política de mayor apertura a la inversión extranjera en comparación con Chile. Esto ha llevado a un rápido crecimiento de la industria, con la entrada de múltiples compañías extranjeras que buscan explotar estos recursos. Otros productores menores como Bolivia, Brasil, Portugal y EE.UU. poseen reservas significativas pero con una producción a menor escala. Bolivia, en particular, tiene una de las mayores reservas de litio del mundo, pero su decisión de mantener la industria bajo estricto control estatal ha limitado la explotación efectiva de sus recursos.

China ha construido su liderazgo en la industria de baterías de litio mediante una estrategia a largo plazo que combina control sobre el procesamiento de materiales, adquisiciones estratégicas en el extranjero y subsidios estatales para el desarrollo de tecnologías avanzadas. A pesar de no ser el mayor productor de litio, su posición en la refinación y fabricación de baterías lo convierte en un actor indispensable en la transición energética global. Su control del refinamiento le permite refinar aproximadamente el 60% del litio mundial y producir alrededor del 75% de todas las baterías de ion-litio. Esto le otorga una ventaja estratégica, ya que cualquier interrupción en su cadena de producción puede afectar a los fabricantes de vehículos eléctricos y almacenamiento energético en todo el mundo. Como se muestra en el siguiente gráfico China tiene un interés especial por el control de los minerales que se utilizan para baterías o los conocidos como minerales de transición.

Tabla 4/ Presencia china en el procesado de minerales estratégicos y habilitadores de tecnologías limpias



[Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2021).]

A través de adquisiciones y asociaciones con empresas mineras en Australia, Chile y Argentina, China ha asegurado acceso continuo a materias primas para mantener su liderazgo en la industria. Su dominio también conlleva riesgos geopolíticos, pues ha utilizado su control sobre las materias primas en conflictos comerciales pasados, como ocurrió en 2010 con las tierras raras frente a Japón. Si las tensiones con EE.UU. y la UE aumentan, existe el riesgo de que Beijing utilice su control sobre el litio como herramienta de presión, afectando los precios y la disponibilidad de baterías a nivel global.

Ante la creciente dependencia de China, EE.UU. y la Unión Europea han adoptado políticas para fortalecer su autonomía en la cadena de suministro de litio y baterías. Estas medidas buscan evitar que el gigante asiático continúe dictando los precios y el acceso a las materias primas necesarias para la movilidad sostenible. En EE.UU., el reconocimiento del litio como recurso estratégico llevó a su inclusión en la lista de materiales críticos para la seguridad nacional en 2020. A través de la Ley de Reducción de la Inflación (IRA), el gobierno estadounidense ha otorgado subsidios y créditos fiscales a empresas que establezcan infraestructura para la extracción y refinación de litio en suelo estadounidense, además de buscar alianzas con Australia, Canadá y Argentina para diversificar su acceso al litio. La Unión Europea, por su parte, ha lanzado la Estrategia de Materias Primas Críticas para aumentar la extracción de litio en Europa y reducir la dependencia de importaciones de regiones políticamente inestables. Ha

negociado asociaciones con Chile y Argentina para garantizar el acceso a litio bajo estándares ambientales más estrictos y ha destinado fondos para desarrollar tecnología de refinamiento dentro de Europa, reduciendo la necesidad de procesar litio en China antes de su uso en la fabricación de baterías.

El litio no es solo un recurso clave para la electrificación del transporte, sino también un campo de disputa geopolítica entre China, EE.UU., la UE y los países productores. La lucha por el control de la cadena de suministro de baterías tiene implicaciones económicas, ambientales y estratégicas que afectarán el desarrollo de la movilidad sostenible en las próximas décadas. Si China mantiene su dominio en el refinamiento de litio, podría consolidar su ventaja en la industria de baterías y condicionar el acceso global a esta tecnología. Por otro lado, si EE.UU. y la UE logran diversificar la producción y procesamiento, podrían reducir la volatilidad del mercado y garantizar una mayor seguridad energética para sus economías. El futuro de la movilidad eléctrica no solo dependerá del avance tecnológico, sino también de la capacidad de los gobiernos y empresas para equilibrar la distribución del litio, evitar monopolios en su procesamiento y establecer acuerdos internacionales que fomenten un suministro estable y sostenible de este recurso estratégico.

4.1.2 EVOLUCIÓN DE LITIO

La transición hacia tecnologías sostenibles ha provocado un aumento exponencial en la demanda de litio, especialmente a partir de la última década. Inicialmente, entre 1995 y 2010, el litio se destinaba principalmente a baterías recargables para dispositivos electrónicos como móviles y portátiles, así como a la industria de cerámica y vidrio [4]. Sin embargo, a partir de 2010, la electrificación del transporte marcó un cambio significativo. La adopción de vehículos eléctricos (VE), impulsada por subsidios en mercados como Europa, China y Estados Unidos, aumentó la necesidad de baterías de ion-litio [5]. Paralelamente, se comenzó a explorar el uso de estas baterías en sistemas de almacenamiento energético para integrar fuentes renovables como la solar y la eólica en las redes eléctricas [6].

Entre 2015 y 2020, el mercado experimentó una aceleración marcada por la producción masiva de vehículos eléctricos, liderada por fabricantes como Tesla, BYD y Nissan [7]. Este periodo también vio a China consolidarse como el principal mercado de vehículos eléctricos y almacenamiento estacionario, representando más del 50% de la demanda global de baterías [8]. Además, la construcción de gigafactorías en todo el mundo escaló la capacidad de producción de baterías [9]. Finalmente, entre 2020 y 2023, la transición hacia fuentes de energía limpias y la implementación de políticas como el "Green Deal" de la Unión Europea impulsaron la demanda de litio a niveles récord [10].

La electrificación del transporte y el almacenamiento de energía renovable ahora representan la mayor parte del consumo de litio, reflejando su papel esencial en la transición energética global. Sin embargo, este crecimiento plantea importantes desafíos ambientales y logísticos para garantizar su sostenibilidad [11].

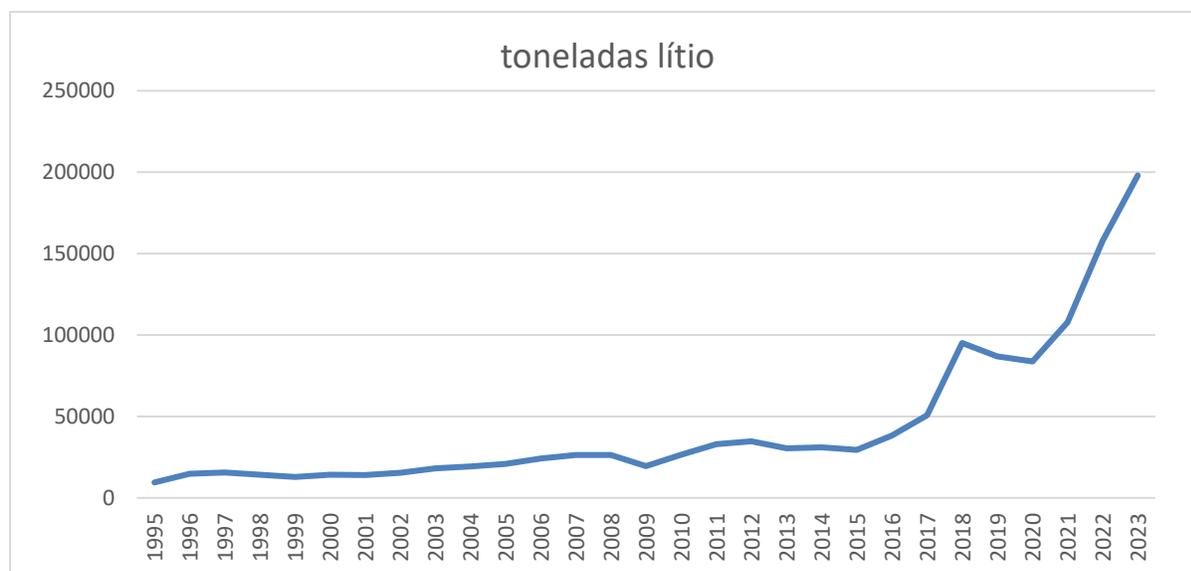


Ilustración 13/Toneladas extraídas de litio

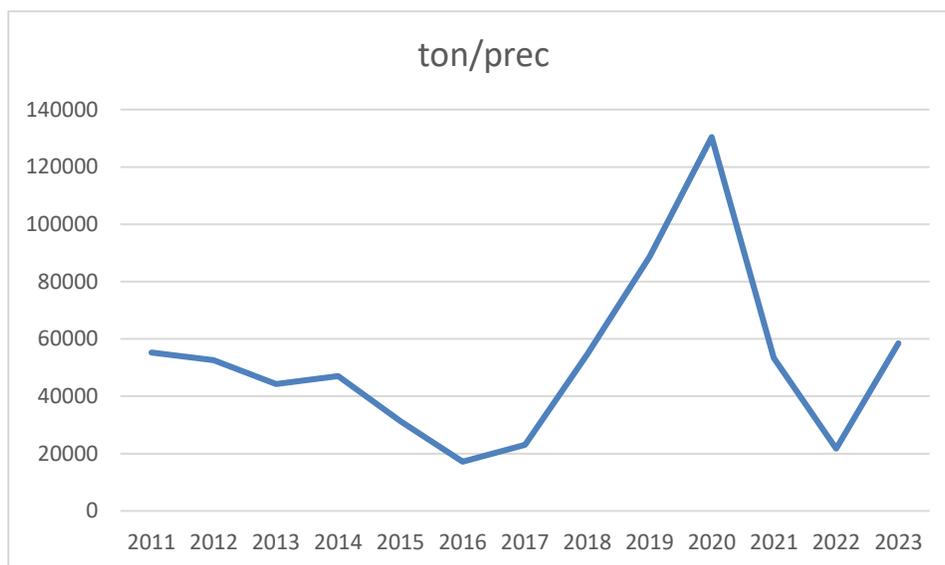


Ilustración 10/Toneladas de litio sin tener en cuenta el precio

Para analizar cómo las previsiones de demanda de los tres principales usos de las baterías de litio afectarían a la capacidad total explotable, se llevaron a cabo los siguientes estudios de mercado. Los cálculos de cada tipo de demanda se basan en las estimaciones realizadas por diversas entidades sobre la demanda de vehículos eléctricos (EV), los gigavatios de almacenamiento estacionario proyectados y el porcentaje estimado de vehículos industriales electrificados. Con esta información, y utilizando un modelo de batería genérica aplicable a los tres casos, es posible estimar las toneladas de litio que cada una de estas industrias requerirá en los próximos años, con proyecciones hasta 2040. Los cálculos y la información de donde se obtienen las cifras de predicciones futuras se encuentran en la hoja de Excel del anexo sobre las proyecciones de litio. A partir de los cálculos realizados, es posible determinar el porcentaje anual que se extrae del litio explotable.

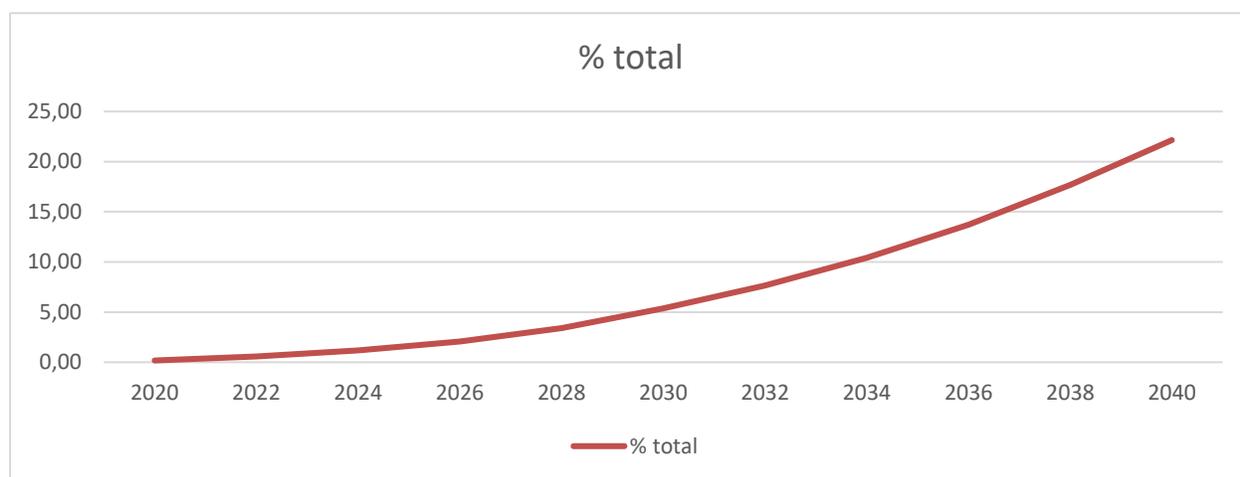
Tabla 5/ Evolución del consumo de litio económicamente minable

año	% li EV	% li almacenamiento	% li vehículos industriales	% total
2020	0,13	0,05	0,00	0,17
2022	0,39	0,08	0,11	0,58
2024	0,82	0,13	0,23	1,19
2026	1,45	0,24	0,38	2,08
2028	2,36	0,43	0,62	3,42
2030	3,62	0,81	0,93	5,35
2032	5,27	1,21	1,17	7,66
2034	7,37	1,62	1,42	10,41
2036	9,98	2,02	1,70	13,70
2038	13,13	2,56	2,00	17,69
2040	16,86	2,95	2,33	22,14

Tabla 6/ tanto por ciento consumido de las reservas globales por año

Como se observa en la tabla vemos los porcentajes acumulados de la extracción del litio, se observa un minado creciente en el corto plazo que busca suplir la creciente demanda de los vehículos eléctricos.

Tabla 7/ tanto por ciento minado del litio total



PROBLEMAS DE LA CADENA DE SUMINISTRO

La demanda de litio está estrechamente vinculada a la producción de baterías, cuyo crecimiento depende de múltiples sectores, principalmente la electrificación del transporte, las aplicaciones en redes inteligentes (**smart grids**), el almacenamiento estacionario y la electrificación industrial. Estos sectores representan motores de expansión para el mercado de baterías en las próximas décadas.

En conclusión, el mercado de baterías no se enfrenta a un único factor de crecimiento, sino a una confluencia de múltiples catalizadores que, en conjunto, impulsarán una expansión sin precedentes. Esto nos lleva a una pregunta crítica: ¿cómo se distribuirá este mercado en el futuro y qué tecnologías dominarán?

Siendo el litio el metal más utilizado en las baterías gracias a sus propiedades únicas, todo indica que continuará liderando el mercado en el corto y mediano plazo. Sin embargo, surge la incertidumbre sobre los límites de este crecimiento: ¿hasta qué punto puede incrementarse la producción de baterías de litio antes de que la extracción y el procesamiento de este recurso comiencen a ser menos rentables? En ese escenario, es probable que surjan alternativas competitivas basadas en otros metales, impulsadas por avances tecnológicos y la necesidad de diversificar materiales para garantizar la sostenibilidad del mercado.

En el caso anterior se calculó las toneladas que se minarán en función de la demanda de los principales sectores que consumen baterías de litio, pero el punto importante es la fecha en la que el litio pasa de ser económicamente rentable a no rentabilizar el coste del minado. El artículo titulado *“Peak Metals, Minerals, Energy, Wealth, Food and Population: Urgent Policy Considerations for a Sustainable Society”* analiza los máximos históricos de extracción de diversos materiales, destacando que la disponibilidad de muchos metales podría agotarse mucho antes de lo que comúnmente se anticipa. Entre 1900 y 2010, la actividad minera experimentó un crecimiento exponencial, ejerciendo una presión significativa sobre las reservas de numerosos recursos.

La tabla presentada a continuación, extraída de dicho artículo, ilustra los años estimados en los que la minería dejaría de ser rentable para la producción de determinados metales. Muchos de estos metales son fundamentales en tecnologías actuales, como las baterías modernas, y su futura escasez plantea importantes desafíos para la sostenibilidad y la innovación tecnológica.

Tabla 8/tabla del artículo “Peak Metals, Minerals, Energy, Wealth, Food and Population: Urgent Policy Considerations for a Sustainable Society”

Table 1 Estimated burn-off times in years for a selection of important materials and metals, considering the different recycling, materials use and populations scenarios. Output estimates of burn-off times are in years. All values are years counted from 2010 and forwards. BAU = BAU (business-as-usual) with recycling as today. 50% = improved habits in the market, at least 50% recycling or maintain what we have higher than 50%, improving gold recycling to 95%. 70% = improve recycling to at least 70% for all elements, gold to 95%. 90% = improve all recycling to 90%, except gold to 96%. 95% = improve all recycling to 95%, gold, platinum, palladium, rhodium to 98%. 3bn = improve all recycling to 95%, except gold, platinum, palladium and rhodium to 98%, assume same per capita use as in Target 4, but assume that population is reduced to 3 billion. 1½bn = improve all recycling to 95%, except gold, platinum, palladium and rhodium to 98%, assume ½ of the present per capita resource use in Target 4, but assume that population is reduced to 3 billion. All numbers are years after 2010.

Element	BAU	50%	70%	90%	95%	3bn	1½bn
Iron	79	126	316	316	632	1,263	2,526
Aluminium	132	184	461	461	921	1,842	3,684
Nickel	42	42	209	419	838	1,675	3,350
Copper	31	31	157	314	628	1,256	2,512
Zinc	20	37	61	61	123	245	490
Manganese	29	46	229	457	914	1,829	3,668
Indium	19	38	190	379	759	1,517	3,034
Lithium	25	49	245	490	980	1,960	3,920
Rare Earths	455	864	4,318	8,636	17,273	34,545	69,000
Yttrium	61	121	607	1,213	2,427	4,854	9,708
Zirconium	67	107	533	1,067	2,133	4,267	4,554
Tin	20	30	150	301	602	1,204	2,408
Cobalt	113	135	677	1,355	2,710	5,419	10,838
Molybdenum	48	72	358	717	1,433	2,867	5,734
Wolfram	32	52	258	516	1,031	2,062	4,124
Tantalum	171	274	1,371	2,743	5,486	10,971	22,000
Niobium	45	72	360	720	1,440	2,880	5,760
Helium	9	17	87	175	349	698	1,396
Chromium	225	334	1,674	3,348	6,697	13,400	26,800
Gallium	500	700	3,500	7,000	14,000	28,000	56,000
Germanium	100	140	700	1,400	2,800	5,600	11,200
Titanium	400	400	2,000	4,000	8,000	16,000	32,000
Tellurium	387	387	1,933	3,867	7,733	15,467	30,934
Antimony	25	35	175	350	700	1,400	2,800
Selenium	208	417	5,208	10,417	20,833	41,667	83,000
Gold	48	48	71	357	714	1,429	2,858
Silver	14	14	43	214	429	857	1,714
Platinum	73	73	218	1,091	2,182	4,364	8,728
Rhodium	44	44	132	660	1,320	2,640	5,280
Uranium	61	119	597	5,972	11,944	23,887	47,500
Phosphorus	80	128	640	3,200	6,400	12,800	25,600
Legend, yrs	0-50	50-100	100-500	500-1,000	1,000-5,000	>10,000	

La tabla anterior representa una selección de metales clasificados en función de su importancia en la fabricación de tecnologías de baterías. Este análisis pone de manifiesto que, si no se implementan cambios significativos en los patrones de consumo y estrategias de reciclaje, será inevitable sustituir muchos de los materiales actualmente esenciales para la producción de la mayoría de las baterías.

En particular, el litio, considerado el pilar fundamental de las tecnologías de almacenamiento de energía, destaca por su criticidad. Incluso bajo un escenario optimista en el que se alcance una tasa de reciclaje del 90%, las reservas globales de litio podrían agotarse en apenas **980 años** al ritmo de extracción actual. Este dato resalta la necesidad urgente de diversificar las materias primas empleadas, optimizar los procesos de recuperación de metales y explorar alternativas sostenibles.

La información recopilada refleja la cantidad de años estimados de extracción rentable restante para cada elemento clave:

Elemento	Años de vida
Lithium	25
Nickel	42
Cobalt	113
Manganese	29
Phosphorus	80
Rare Earths	455
Aluminium	132
Titanium	400
Zinc	20
Tin	20
Selenium	208

En la tabla que se presenta a continuación, se pueden observar los distintos tipos de tecnologías en baterías, previamente desarrolladas en la sección: “Tecnologías Actuales en Sistemas de Almacenamiento de Energía”. En ella se destacan los dos principales elementos que las conforman, lo que, junto con la información analizada anteriormente, permite extraer conclusiones sobre cuáles de estas tecnologías podrían tener un futuro menos viable sin un cambio significativo en los métodos de reciclaje o reutilización de las baterías.

Los tipos de batería se han ordenado de menor número de años de vida a mayor, siendo las baterías de Zinc-Aire las que primero sufrirán debido a la falta de zinc dentro de 20 años.

Tabla 9/años de vida por material y batería

Tipo de Batería	Material Principal 1	Años de vida material 1	Material Principal 2	Años de vida material 2	Cuota de mercado
Zinc-Air (Zinc-Aire)	Zinc (Zn)	20	Oxígeno (O ₂) del aire	-	
Silicon-Anode (Ánodo de Si)	Silicio (Si)	25	Litio (Li)	25	60%
Lithium-Ion (Li-ion)	Litio (Li)	25	Grafito	-	
Lithium Polymer (LiPo)	Litio (Li)	25	Electrolito de Polímero	-	
Solid-State (Estado Sólido)	Litio (Li)	25	Electrolito Sólido	-	

Lithium-Sulfur (Li-S)	Litio (Li)	25	Azufre (S)	-	
Nickel-Cadmium (NiCd)	Níquel (Ni)	42	Cadmio (Cd)	-	10%
Nickel-Metal Hydride (NiMH)	Níquel (Ni)	42	Aleación de Hidruro Metálico	-	
Lead-Acid (Plomo-Ácido)	Plomo (Pb)	79	Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	-	
Aluminum-Air (Aluminio-Aire)	Aluminio (Al)	132	Oxígeno (O ₂) del aire	-	
Sodium-Ion (Sodio-Ión)	Sodio (Na)	-	Grafito o Carbón Duro	-	
Magnesium-Ion (Mg-Ion)	Magnesio (Mg)	-	Electrolito Compatible	-	

La tabla presentada permite extraer una conclusión fundamental: las baterías con mayor cuota de mercado en la actualidad corresponden, en su mayoría, a tecnologías cuya vida útil de materiales clave es significativamente limitada. Este hecho genera una presión considerable sobre el sector, ya que el crecimiento continuo de la demanda de baterías no solo amenaza la sostenibilidad de los recursos, sino que también exige la implementación de soluciones estructurales para garantizar la viabilidad futura del mercado.

El predominio de las baterías de Ion de Litio y sus variantes, como las de Polímero de Litio o Estado Sólido, refleja una fuerte dependencia de materiales críticos como el litio y el cobalto. Estas tecnologías, responsables de una porción mayoritaria de la demanda global de estos recursos, presentan un horizonte de disponibilidad de aproximadamente 25 años bajo un escenario de uso continuado. En contraste, las baterías basadas en materiales más abundantes,

como el aluminio o el sodio, tienen una proyección mucho más sostenible, aunque su adopción masiva está condicionada por limitaciones tecnológicas y de rendimiento.

Este desequilibrio en la dinámica de mercado plantea un desafío estratégico: el sector no puede depender indefinidamente de tecnologías que intensifican la presión sobre las reservas de materiales críticos. Si bien la demanda de baterías no muestra signos de desaceleración debido a la electrificación global, la única forma viable de mitigar la presión sobre los recursos es fomentando un cambio en la composición del mercado. Esto implica impulsar tecnologías emergentes, como las baterías de Sodio-Ión o Magnesio-Ión, y mejorar significativamente los sistemas de reciclaje y reutilización para prolongar la vida útil de los materiales.

En definitiva, el análisis destaca la necesidad de una transformación en el sector. Si las tecnologías con menor vida útil de materiales continúan dominando el mercado, el impacto sobre los recursos será insostenible. Por lo tanto, es imprescindible priorizar la diversificación tecnológica y la sostenibilidad como pilares estratégicos para garantizar el equilibrio entre crecimiento y preservación de los recursos en las próximas décadas.

Capítulo 5. SELECCIÓN ÓPTIMA DE BATERÍAS: FACTORES CLAVE PARA CADA SEGMENTO

En este capítulo se compilan los aspectos tratados previamente. A partir de una serie de ponderaciones y criterios estructurados se seleccionan las baterías más adecuadas para cada necesidad, considerando tanto la evolución prevista de la movilidad como las soluciones presentadas en la sección dedicada a alternativas no basadas en combustibles.

DESCARTE DE LOS TIPOS DE BATERÍA CON UNA MENOR ESPERANZA DE VIDA

Se adopta como hipótesis un comportamiento lineal de la sociedad en cuanto al consumo de materias primas, lo que implica asumir el escenario más crítico respecto a la vida útil de ciertos recursos mineros.

Para descartar las baterías lo más sencillo es seleccionar las baterías que por la tipología de los materiales que usa tienen mayor recorrido, para ello he descartado los materiales con una vida útil menor a 40 años.

Tabla 10/Años de vida de material por batería

Tipo de Batería	Material Principal 1	Años de vida del material 1	Material Principal 2	Años de vida del material 1	Cuota de mercado
Nickel-Cadmium (NiCd)	Níquel (Ni)	42	Cadmio (Cd)	-	

Nickel-Metal Hydride (NiMH)	Níquel (Ni)	42	Aleación de Hidruro Metálico	-	10%
Lead-Acid (Plomo-Ácido)	Plomo (Pb)	79	Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	-	
Aluminum-Air (Aluminio-Aire)	Aluminio (Al)	132	Oxígeno (O ₂) del aire	-	
Sodium-Ion (Sodio-Ión)	Sodio (Na)	-	Grafito o Carbón Duro	-	
Magnesium-Ion (Mg-Ion)	Magnesio (Mg)	-	Electrolito Compatible	-	

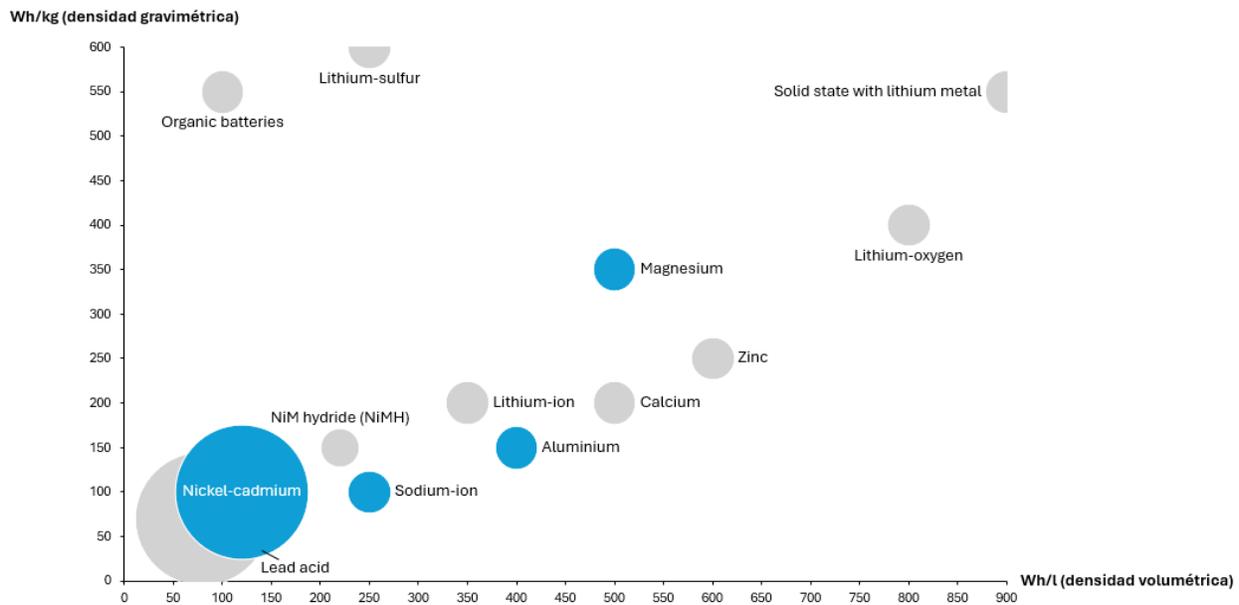


Ilustración 14/ Representación de las densidades de cada batería

La gráfica muestra claramente cómo las tecnologías actuales de baterías comerciales (como plomo-ácido, níquel-cadmio, hidruro metálico de níquel y litio-ion) tienen densidades energéticas volumétricas y gravimétricas relativamente bajas, situándose en la parte inferior izquierda del gráfico. Las tecnologías emergentes y futuras presentan mejoras significativas en términos de capacidad energética por volumen (Wh/l) y peso (Wh/kg), destacando especialmente las baterías de estado sólido con litio metálico y las baterías de litio-oxígeno, con valores energéticos muy superiores.

SISTEMA DE SELECCIÓN DE BATERÍAS PARA LOS PRINCIPALES USOS DE LA MOVILIDAD

5.1.1 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE

En este capítulo desarrollamos un **sistema multicriterio** para elegir la química de batería más adecuada en cuatro segmentos de vehículo eléctrico:

- **Coche** (pack 60 kWh, consumo 15 kWh/100 km)
- **Moto** (pack 20 kWh, consumo 8 kWh/100 km)
- **Aerotaxi** (pack 100 kWh, consumo 50 kWh/100 km)
- **Camión/Autobús** (pack 150 kWh, consumo 200 kWh/100 km)

Los criterios de evaluación elegidos son:

1. **Eficiencia autonomía–peso** (km/kg)
2. **Huella de producción** (kg CO₂/pack)
3. **Densidad energética** (Wh/kg)
4. **Densidad de potencia** (W/kg)
5. **Velocidad de recarga** (minutos 0 → 80 %)
6. **Seguridad** (índice 1 – 10)
7. **Ciclo de vida** (n.º ciclos hasta 80 % DoD)

Cada criterio se normaliza a [0–1] y se pondera de forma distinta según el tipo de vehículo (sección 7.5).

Tabla 11/ficha técnica de cada batería

Química	ρ (Wh/kg)	P (W/kg)	Recarga (min)	Seguridad	Ciclos	e (kg CO ₂ /kWh)
NMC	250	400	30	8	1 000	100
LFP	170	300	20	9	1 500	80
Li-S	450	400	60	6	250	120
Solid- State	300	500	10	3	1 500	150
Na-Ion	100	250	45	2	2 000	80
Al-Air	1 300	500	–	4	250	40
Mg-Ion	400	300	45	3	2 000	70
Si- Anode	500	400	20	5	1 500	90
Zn-Air	400	200	60	2	50	35

Ahora se realizará los cálculos de autonomía teórica, masa del pack, índice autonomía peso y la huella de producción. Estas como se comenta en la introducción al capítulo son variables muy importantes en la selección de una batería.

Cálculo masa del pack:

$$M_{j,v} = \frac{C_v [Wh] [kg]}{\rho_j [Wh/kg]}$$

Cálculo de la autonomía teórica:

$$A_{j,v} = \frac{C_v [KWh]}{C_v \left[\frac{KWh}{100 Km} \right]} * 100 Km$$

Índice de autonomía- peso:

$$I_{j,v} = \frac{A_{j,v}}{M_{j,v}} \left[\frac{km}{kg} \right]$$

Huella de producción:

$$H_{j,v} = e_j \left[\frac{kgCO_2}{kWh} \right] \times C_v[kWh][kgCO_2]$$

Tabla 12/ ponderaciones por segmento

Criterio	Coche	Moto	Aerotaxi	Camión/Bus
1. Autonomía–peso (I)	0.25	0.30	0.20	0.20
2. Huella producción (H)	0.20	0.15	0.10	0.15
3. Densidad energética (ρ)	0.15	0.20	0.10	0.10
4. Densidad de potencia (P)	0.10	0.10	0.25	0.10
5. Recarga (min)	0.10	0.10	0.20	0.05
6. Seguridad	0.10	0.10	0.05	0.20
7. Ciclos	0.10	0.05	0.10	0.20
Total	1	1	1	1

5.1.2 CÁLCULO DE LA PUNTUACIÓN FINAL

Para cada química j y segmento v:

$$P_{j,v} = \sum_{i=0}^7 W_{i,v} * S_{i,j}$$

Tabla 13/ puntuación de cada batería sobre cada tipo de uso

Química	Coche	Moto	Aerotaxi	Camión/Bus
NMC	0.3781	0.3445	0.4192	0.4582
LFP	0.3728	0.3110	0.3261	0.5009
Li-S	0.4029	0.4139	0.5191	0.3781
Solid-State	0.2553	0.2348	0.3815	0.3273
Na-Ion	0.3084	0.2280	0.3425	0.3430
Al-Air	0.3890	0.4204	0.3187	0.3437
Mg-Ion	0.3155	0.2854	0.3319	0.3565
Si-Anode	0.3983	0.3854	0.4639	0.4121
Zn-Air	0.2287	0.2186	0.3286	0.2736

Las baterías de litio-azufre resultan técnicamente óptimas para turismos y motocicletas ligeras, dado que alcanzan la mayor densidad energética del conjunto evaluado y reducen significativamente la masa del sistema de almacenamiento. No obstante, su limitada vida útil—aproximadamente 250 ciclos a un 80 % DoD—y su huella de carbono en fabricación exigen su integración con ánodos de silicio o la espera a desarrollos de segunda generación con electrolitos más estables para aplicaciones que requieran durabilidad y reducido coste de mantenimiento.

En el caso de los aerotaxis, el planteamiento de misión vertical y la necesidad de recargas rápidas colocan de nuevo a las baterías de litio-azufre y a las de ánodo de silicio en los primeros puestos de rendimiento potencia-peso. Sin embargo, los estrictos requisitos de certificación aeronáutica y los elevados niveles de seguridad operativa previstos hacen que las baterías de estado sólido, una vez alcanzados costes competitivos y demostrada su fiabilidad térmica, se proyecten como la solución definitiva para operaciones de despegue y aterrizaje continuo.

Para vehículos de transporte pesado—camiones de larga distancia y autobuses de ruta urbana o interurbana—la prioridad recae en la estabilidad térmica, la seguridad intrínseca y el ciclo de vida prolongado. En este ámbito, las baterías de fosfato de hierro y litio (LFP) ofrecen más de 1 500 ciclos de vida útil, baja inflamabilidad y procesos de reciclaje consolidados, compensando con creces su densidad energética reducida mediante menores costes de reposición y mantenimiento.

Además de los resultados cuantitativos, deben considerarse varios factores complementarios. El coste de la celda (€/kWh) y el coste total de propiedad influyen de manera crítica en la viabilidad industrial de tecnologías emergentes, las cuales actualmente presentan precios superiores al doble o triple de los sistemas convencionales (NMC, LFP). Adicionalmente, la disponibilidad de materias primas—por ejemplo, la reducción de la dependencia del cobalto y la abundancia de azufre—introduce un componente geopolítico en la selección de la química más adecuada.

El comportamiento en condiciones ambientales extremas (temperaturas muy bajas o elevadas, alta humedad) modifica de forma sensible el rendimiento de ciertas químicas, lo que puede requerir sistemas de gestión térmica más complejos y costosos. En paralelo, la segunda vida y el reciclado de baterías constituyen un elemento estratégico: los procesos de recuperación de LFP y NMC alcanzan eficiencias superiores al 90 %, mientras que las tecnologías emergentes deben desarrollar esquemas de reciclaje específicos antes de poder igualar esos niveles.

Finalmente, la tendencia futura apunta a la coexistencia de varias tecnologías en función del segmento de aplicación. Las configuraciones para turismos y motos tenderán a combinar litio-azufre con ánodos de silicio o grafito mejorado; los aerotaxis incorporarán baterías de estado sólido una vez resueltos los desafíos de coste y certificación; y el transporte pesado conservará la primacía de LFP, potenciado por nuevas arquitecturas de celdas y electrolitos que incrementen aún más su vida útil y eficiencia operativa.

Capítulo 6. MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR

COMO PUEDE AYUDAR LA ECONOMÍA CIRCULAR

Tras revisar el comportamiento reciente del mercado de materias primas y los riesgos estructurales de la cadena de suministro del litio, se vuelve imprescindible adoptar un modelo que prolongue la vida útil de las baterías. La economía circular, inspirada en los ciclos naturales de la Tierra, ofrece una respuesta eficiente y sostenible frente al modelo lineal tradicional, caracterizado por el consumo intensivo de recursos y la generación de residuos.

Este capítulo explora cómo aplicar un enfoque circular al ámbito de las baterías, estructurando el análisis en torno a una jerarquía de estrategias (reparación, reutilización, reacondicionamiento y reciclaje) que permiten alargar su ciclo de vida útil y reducir la presión sobre los recursos primarios. Junto a estas estrategias, se abordan modelos operativos que maximizan el uso de las baterías a lo largo de su vida útil mediante el uso compartido, el alquiler, la gestión comunitaria o el intercambio modular.

Además, se introduce un elemento clave en la transición hacia una industria verdaderamente circular: la **simbiosis industrial**. Este concepto se basa en la interconexión de diferentes sectores productivos para que los residuos o subproductos generados por una industria se conviertan en materias primas de otra, eliminando así el concepto de “desecho” y creando valor en cada etapa. En el caso de las baterías, esta simbiosis puede darse, por ejemplo, entre empresas de movilidad eléctrica, centros de datos, operadores energéticos y recicladores, generando ecosistemas industriales más resilientes, colaborativos y eficientes.

A partir de esta visión conceptual, el resto del capítulo se centra en la evaluación técnica y económica de un modelo de reutilización en cascada de baterías basado en principios de economía circular, modularidad y ecodiseño. Para ello:

- Se propone un modelo completo de simulación que estima la degradación real de cada celda en función de su uso y permite redistribuir las baterías hacia nuevas aplicaciones según su estado de salud (SoH).
- Se analiza la rentabilidad de este modelo circular frente al modelo lineal convencional, cuantificando los costes asociados al reprocesamiento, testing, encapsulado, transporte y operación.
- Se dimensiona una nave industrial de reprocesamiento, considerando el número de carretillas, estaciones de testeo, personal necesario y costes fijos de operación.
- Se calculan los beneficios ambientales y de ahorro en emisiones de CO₂, así como el potencial ingreso por créditos de carbono generados o la valorización del litio recuperado.
- Finalmente, se presentan indicadores clave que miden la eficiencia energética, la circularidad material y la productividad del sistema, con resultados cuantificados que respaldan la viabilidad técnica, económica y ambiental del modelo.

Este enfoque pretende demostrar que la adopción de prácticas circulares en el uso de baterías no solo es posible, sino también rentable, escalable e integrable en entornos industriales multisectoriales mediante estrategias de simbiosis.

ESTRUCTURA ANALÍTICA DEL MODELO Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Finalidad del modelo y estructura de cálculos posteriores

El presente capítulo tiene por finalidad analizar la viabilidad técnico-económica de un sistema industrial de reutilización en cascada de baterías de vehículos eléctricos, conforme a los principios de la economía circular. Esta evaluación se desarrolla desde una doble perspectiva: por un lado, mediante la simulación detallada del proceso de degradación funcional de las celdas; por otro,

mediante la caracterización física, operativa y financiera de una planta de reprocesamiento adaptada a dicho modelo.

La meta es demostrar que este enfoque no solo permite maximizar la vida útil y el valor económico de las baterías, sino que también puede integrarse de manera escalable y rentable en entornos industriales multivehículo. La metodología parte de supuestos técnicos fundamentados y contempla todas las etapas críticas del ciclo circular, incluyendo modelado de degradación, testeo, reacondicionamiento modular, logística interna, análisis de CAPEX/OPEX y estimaciones de ahorro comparativo frente a un modelo lineal.

6.1.1 BLOQUES DE ANÁLISIS Y CÁLCULOS A DESARROLLAR

6.1.1.1 Simulación de degradación funcional de baterías

Se construye un modelo computacional para representar el envejecimiento progresivo de las celdas en función de su uso en distintas aplicaciones. Las baterías se degradan secuencialmente al pasar por vehículos con demandas energéticas decrecientes, desde coches eléctricos hasta herramientas portátiles y almacenamiento estacionario. Los principales objetivos de este modelo son:

- Estimar el número de etapas antes del reciclaje (umbral de SoH ≤ 50 %).
- Generar datos trazables para su posterior explotación logística, predictiva y financiera.

6.1.1.2 Dimensionamiento operativo de la planta de reprocesamiento

Se define el diseño técnico y logístico de una nave industrial capaz de recibir, clasificar y reacondicionar baterías para su reasignación. Los cálculos incluyen:

- Superficie operativa necesaria, considerando rotación de inventario, zonas de acopio y circulación.
- Infraestructura de testeo para evaluar capacidad, resistencia interna y seguridad térmica de las celdas.

-
- Número de carretillas elevadoras requeridas para manejo diario del flujo de baterías.

6.1.1.3 Estimaciones de inversión inicial (CAPEX)

Se calculan todos los componentes asociados a la inversión fija necesaria para implementar el sistema, incluyendo:

- Encapsulado modular reutilizable para cada tipo de dispositivo.
- Hardware y licencias de sistemas BMS.
- Estaciones de testeo industrial para celdas y módulos.
- Acondicionamiento técnico de la nave (infraestructura eléctrica, PCI, seguridad).
- Equipamiento logístico (carretillas, herramientas de transporte).
- Estimación del coste inicial de transporte y manipulación para puesta en marcha.

6.1.1.4 Costes operativos anuales (OPEX)

Se estiman los costes fijos y variables asociados a la operación continua de la planta, incluyendo:

- Alquiler de la nave (calculado sobre 21.000 m²).
- Mantenimiento, limpieza y seguros industriales.
- Personal técnico y operarios logísticos.
- Costes eléctricos y de mantenimiento de las estaciones de testeo.

6.1.1.5 Costes por reprocesamiento entre etapas

Cada transición entre usos implica un conjunto de costes operativos adicionales que se desglosan en:

- Transporte entre usuarios o unidades de procesamiento.

-
- Mano de obra para desmontaje y reacondicionamiento.
 - Coste de testeo y certificación para garantizar la seguridad y funcionalidad del nuevo uso. Estas estimaciones permiten calcular el OPEX incremental por cada etapa de la cascada.

6.1.1.6 Estimación de ahorro operativo frente al modelo lineal

Se realiza una comparación directa entre el coste de reacondicionar una batería y el coste de adquirir una nueva unidad para cada segmento de uso (moto, scooter, bicicleta, herramienta). Esto permite:

- Calcular el ahorro económico unitario por etapa.
- Determinar el número total de baterías sustituidas.
- Estimar los ingresos internos derivados del aprovechamiento circular.

6.1.1.7 Cálculo del ingreso adicional por créditos de carbono

Se cuantifican las emisiones de CO₂ evitadas por cada batería a lo largo de su ciclo de vida extendido. Con base en el valor medio del mercado voluntario de créditos de carbono, se estima el ingreso monetizable por reducción de huella ambiental. Este dato se incorpora al flujo de caja final del modelo.

DEFINICIÓN DEL MODELO DE DEGRADACIÓN

6.1.2 MODELO DE DEGRADACIÓN Y REUTILIZACIÓN EN CASCADA

Como punto de partida del análisis se desarrolla un modelo computacional en Python cuya finalidad es representar, de forma estructurada y realista, el proceso de degradación funcional de un conjunto de baterías a lo largo de su ciclo de vida. Este modelo no simula aspectos físicos como tiempos logísticos, procesos industriales o gestión de recursos, sino que opera a nivel abstracto con baterías que cambian de estado según el vehículo o aplicación donde se utilizan.

-
- Cada batería inicia con un SoH del 100 % y se asigna a uso en coche, hasta acumular una degradación del 10 %.
 - Cada vehículo (coche, moto, bicicleta...) tiene un coeficiente de degradación asociado según su exigencia energética.
 - Conforme la batería pasa a aplicaciones de menor demanda, el modelo actualiza su SoH hasta alcanzar un umbral mínimo, momento en que se recicla.
 - Este proceso emula el flujo circular en cascada: por ejemplo, una batería con SoH < 90 % puede reasignarse de coche a moto, luego a bicicleta y, finalmente, a almacenamiento, hasta que deje de ser útil.
 - **Entradas:** número de baterías, distribución inicial, perfil de uso, umbrales de SoH, reglas de reasignación.
 - **Salidas:** transiciones por batería, distribución final por SoH, porcentaje reciclado vs. reutilizado, eficiencia energética total (Wh útiles/Wh iniciales).

Este modelo abstracto fragmenta la vida útil funcional de las baterías, generando datos clave que alimentan el análisis económico posterior sobre la viabilidad industrial de una estrategia circular.

6.1.2.1 Contexto

El modelo opera sobre **150 batería×vehículo × 8.256 celdas**, totalizando ~1,24 millones de celdas. Se centra en degradación funcional, no electroquímica, siendo adecuado para generar insumos cuantitativos que respalden análisis posteriores.

6.1.2.2 Objetivos del modelo

Generar un DataFrame trazable por celda y etapa que permita:

- Calcular el número medio de etapas hasta el umbral de reciclaje ($\text{SoH} \leq 70\%$ o $\leq 50\%$).

-
- Evaluar el rendimiento energético por tipo de vehículo.
 - Servir como base para estudios de logística, mantenimiento predictivo, o optimización futura basada en datos reales de BMS.

6.1.2.3 *Funcionamiento*

Entradas clave

- Capacidad inicial por celda: **11,88 Wh** (3,3 Ah × 3,6 V).
- Degradación por ciclo: **d ~ U(0.0005–0.0009)** (0,05–0,09 %).
- Frecuencias de uso:
 - Coche: 1 ciclo cada 10 días
 - Moto: cada 2 días
 - Otros (scooter, bici, herramienta): cada 1–2 día

Lógica de degradación por etapa

El modelo itera por día:

$$\Delta SoH = \frac{1}{fi} * d$$

Una vez se pierde el 10 % de SoH en una etapa, la celda avanza: coche → moto → scooter → bicicleta → herramienta → almacenamiento o reciclaje. El proceso se repite hasta alcanzar un SOh de 50%.

DataFrame resultante

Filas por cada celda y etapa, con campos:

-
- battery_id, battery_type
 - start_capacity, start_SoH
 - cycles_in_stage, end_SoH
 - Opcionales: days_in_stage, energy_delivered

Este formato permite:

- Calcular etapas promedio, SoH residual y eficiencia energética.
- Identificar aplicaciones con mayor degradación.
- Alimentar futuras rutinas de optimización o mantenimiento predictivo

6.1.2.4 Áreas de mejora y consideraciones críticas

Si bien el modelo desarrollado permite capturar la degradación funcional de las baterías a lo largo de múltiples etapas de uso, presenta ciertas limitaciones que conviene revisar con espíritu crítico, tanto desde una perspectiva técnica como metodológica.

En primer lugar, el umbral de degradación fijado en un 10 % para determinar la transición entre aplicaciones se mantiene constante en todas las etapas, sin considerar diferencias en las condiciones de uso, exigencia energética o entorno térmico de cada vehículo. Esta uniformidad podría no reflejar adecuadamente la variabilidad operativa real, por lo que sería recomendable estudiar umbrales diferenciados o probabilísticos, ajustados al perfil de cada aplicación.

Asimismo, el modelo no incorpora mecanismos de degradación por envejecimiento en reposo (calendar aging), que en condiciones reales puede representar una proporción relevante de la pérdida de capacidad, especialmente en etapas de baja actividad o almacenamiento. Diversos estudios reportan pérdidas de entre el 6 % y el 8 % de capacidad en tan solo diez meses de reposo

a temperatura ambiente, lo que sugiere la necesidad de incluir este fenómeno en simulaciones futuras.

Otra limitación destacable es la ausencia de un modelo que contemple el incremento de la resistencia interna (R_i) de las celdas, variable clave que condiciona no solo la pérdida de capacidad sino también la entrega de potencia, la eficiencia y la seguridad operativa del sistema. La incorporación de modelos basados en circuitos equivalentes (ECM), o incluso enfoques híbridos que combinen simulación física y aprendizaje automático, permitiría reflejar de manera más precisa el comportamiento de las baterías en condiciones reales.

Por otra parte, el modelo asume independencia total entre celdas, sin considerar desequilibrios internos ni interacciones dentro de módulos. Esto omite la necesidad de sistemas de rebalanceo o la influencia de celdas atípicas en la vida útil del pack, lo cual podría subestimar ciertos modos de fallo comunes en la operación real.

Cabe destacar también que el modelo no ha sido aún validado con datos empíricos. La integración de información procedente de sistemas reales de gestión de baterías (BMS) permitirá contrastar las estimaciones actuales y, en su caso, calibrar los parámetros para mejorar su fiabilidad predictiva.

Por último, no se han considerado variables operativas relevantes como la temperatura, la profundidad de descarga parcial (DoD), o la tasa de carga/descarga (C-rate), todas ellas reconocidas como factores determinantes en la degradación de celdas y que, por tanto, deberían integrarse en versiones avanzadas del modelo. Se ha supuesto una degradación media suponiendo carga y descarga en umbrales de 20-80% de la capacidad total.

6.1.2.5 Aplicaciones analíticas del modelo

El conjunto de datos generado por el modelo permite una variedad de análisis posteriores que pueden aportar valor tanto a nivel técnico como estratégico:

-
- Cálculo de estadísticas agregadas por tipo de vehículo o etapa, tales como el SoH medio, la desviación típica o la duración promedio de uso.
 - Clasificación de baterías por estado funcional, facilitando su asignación óptima a nuevas aplicaciones en función de su capacidad remanente.
 - Diseño de estrategias de mantenimiento predictivo, mediante la detección anticipada de patrones de degradación que puedan comprometer la operación.
 - Validación empírica del modelo y ajuste fino de parámetros mediante el cruce con datos reales procedentes de sistemas BMS.

6.1.2.6 Líneas de mejora futuras

Con base en lo anterior, se proponen las siguientes líneas de desarrollo para ampliar la robustez y aplicabilidad del modelo:

- Incluir curvas de degradación específicas por temperatura y envejecimiento en reposo, de acuerdo con estudios experimentales.
- Incorporar modelos de circuitos equivalentes (ECM), o combinaciones con algoritmos de machine learning, para simular el crecimiento de la resistencia interna y sus efectos sobre la entrega de potencia.
- Añadir lógica de agrupación y rebalanceo de celdas dentro de módulos, con el fin de representar dinámicas reales de operación en packs.
- Integrar datos reales de SoH, ciclos y voltajes desde sistemas BMS para calibrar y validar el modelo, garantizando así su utilidad como herramienta de análisis predictivo.

6.1.3 RESULTADOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE DEGRADACIÓN FUNCIONAL (PYTHON)

El modelo desarrollado en Python, centrado en la degradación funcional de celdas bajo un esquema de reutilización en cascada, ha permitido generar una base de datos detallada, estructurada y trazable por celda y etapa. Este subsistema de simulación constituye una herramienta clave para anticipar comportamientos operativos, validar umbrales de SoH y establecer condiciones límite de uso técnico previo al reciclaje.

1. Ciclo de vida funcional promedio

A partir de un conjunto inicial de 150 baterías (equivalente a 1.238.400 celdas), se observa que el número medio de etapas de uso por celda es de **cinco transiciones completas**, desde su uso inicial en coche hasta su paso final por herramientas eléctricas. La etapa de almacenamiento estacionario, aunque contemplada teóricamente, se alcanza de forma marginal en la simulación, confirmando que el deterioro acumulado y el coste logístico limitan su viabilidad masiva.

2. Duración operativa por aplicación

Los resultados arrojan una clara estratificación temporal:

- **Coche eléctrico:** duración promedio de ~24 meses (basado en ciclos de 10 días).
- **Moto:** ~12 meses.
- **Scooter y bicicleta eléctrica:** entre 9 y 12 meses por aplicación.
- **Herramientas eléctricas:** ~9 meses.

Estas duraciones se derivan directamente del descenso en el estado de salud (SoH), combinado con la frecuencia de uso y el patrón de consumo energético de cada vehículo tipo.

3. SoH y degradación acumulada

Las baterías avanzan entre etapas tras una degradación funcional del 10 % por uso. Bajo esta lógica, los ciclos de transición se suceden hasta alcanzar el umbral de **SoH \leq 50 %**, punto a partir del cual la batería se retira o destina a reciclaje. Este límite, si bien conservador, se justifica por los riesgos crecientes en términos de eficiencia, seguridad y coste de reacondicionamiento.

4. Intensidad de uso y eficiencia energética

El modelo estima una **energía útil acumulada de aproximadamente 22.000 kWh por batería completa**, lo que representa un aumento superior al 260 % frente al uso lineal convencional (~6.000 kWh). Este dato confirma la validez del enfoque en cascada como estrategia de maximización energética, además de constituir un input directo para la estimación de productividad material y ahorro en emisiones.

5. Patrón de transición y reprocesamiento

En promedio, cada batería requiere **cuatro procesos de reprocesamiento** antes de alcanzar el umbral técnico de inutilización. Esta cifra se considera robusta para el dimensionamiento de la planta, la estimación de costes unitarios por reproceso y la planificación logística de testeo, encapsulado y reasignación modular.

6.1.4 MODELO ECONÓMICO Y EVALUACIÓN DE RENTABILIDAD DEL SISTEMA CIRCULAR

La segunda parte del análisis consiste en un modelo económico que permite evaluar la viabilidad financiera de implantar un sistema circular de reutilización en cascada de baterías a escala industrial. A diferencia del modelo de degradación, este bloque introduce una representación física

y operativa del proceso, basada en la existencia de una planta de reprocesamiento equipada para recibir, testear, reacondicionar y redistribuir baterías procedentes de diferentes etapas de uso.

El modelo parte de los resultados obtenidos en la simulación de degradación, asumiendo un uso medio por tipo de vehículo (por ejemplo, siete años en coches, cinco en motos, tres en scooters o bicicletas). En consecuencia, se considera que las baterías llegarán a la fábrica en distintos momentos del tiempo, lo que introduce una lógica escalonada en la entrada de unidades para su reprocesamiento.

A partir de esta base, se calculan tanto los **costes de capital (CAPEX)** como los **costes operativos (OPEX)** de mantener la infraestructura necesaria, así como los **costes variables** asociados al reprocesamiento individual de cada batería (transporte, testeo, desmontaje, reacondicionamiento y encapsulado). Por otro lado, se estiman los **ingresos potenciales** derivados del aprovechamiento posterior de las baterías reacondicionadas, ya sea mediante venta, alquiler o uso interno en sistemas energéticos.

Elementos evaluados en el modelo:

- **CAPEX:** inversión inicial para habilitar una nave industrial, incluyendo estaciones de testeo, carretillas elevadoras, equipos auxiliares y acondicionamiento del espacio.
- **OPEX:** costes anuales fijos, incluyendo electricidad, agua, seguros, limpieza industrial y otros gastos generales.
- **Costes variables:** gastos por batería procesada (revisión, pruebas, transporte interno, reacondicionamiento).
- **Ingresos:** por baterías reutilizadas en nuevas aplicaciones, servicios asociados (p. ej. almacenamiento comunitario) y posibles incentivos o créditos de carbono.

Indicadores económicos clave:

- Tasa Interna de Retorno (TIR)
- Periodo de amortización
- Coste evitado por sustitución de baterías nuevas
- Emisiones de CO₂ evitadas, con posible monetización

El modelo permite además adaptar el enfoque a diferentes contextos empresariales, incluyendo operadores de movilidad eléctrica con flotas multivehículo, para quienes este sistema puede representar una nueva línea de negocio o una industria complementaria de alto valor añadido. La evaluación económica resulta, por tanto, esencial para determinar la viabilidad real de este enfoque circular en el marco de decisiones estratégicas empresariales.

6.1.5 MÉTODO DE CONEXIÓN DE LAS BATERÍAS AL COCHE Y LOS DISTINTOS VEHÍCULOS Y SU FUNCIONAMIENTO

Para el intercambio de las celdas de las baterías de estos vehículos debemos tener en cuenta varios factores, los factores técnicos que debe suplir la batería para el correcto funcionamiento de los vehículos y el segundo factor es el diseño de las celdas que permita un intercambio simple del conjunto de baterías degradadas por unas nuevas.

Se pretende calcular el número de celdas que serán necesarias del receptor de más prioridad degradado para aportar las características del siguiente receptor.

Supondremos baterías de las siguientes características:

La batería presenta una capacidad total de 100 kWh, distribuida en celdas individuales con una capacidad nominal de 3,3 Ah y una energía específica aproximada de 11,9 Wh por celda, operando a un voltaje nominal de 3,6 V. La resistencia interna de cada celda se estima en 15 mΩ.

Tabla 14/ elementos demandantes, por los que pasan las baterías

Vehículo	Voltaje comercial (V)	Capacidad comercial (Ah)	Energía comercial (Wh)	Configuración (S×P)	Celdas totales
Coche (Tesla Model S 100 kWh)	≈ 355 V nominal	~ 100 kWh pack → 98,4 kWh usable	≈ 98 400 Wh	96 S × 86 P	8 256
Moto (e-bike 48 V 20 Ah)	48	20	48 V × 20 Ah = 960 Wh	14 S × 5 P	14 × 5 = 70
Scooter (e-scooter 48 V 15 Ah)	48	15	48 V × 15 Ah = 720 Wh	13 S × 4 P	13 × 4 = 52
Bicicleta (e-bike 36 V 10 Ah)	36	10	36 V × 10 Ah = 360 Wh	10 S × 4 P	10 × 4 = 40
Herramienta (taladro 18 V 5 Ah)	18	5	18 V × 5 Ah = 90 Wh	5 S × 2 P	5 × 2 = 10

Con los elementos demandantes y las necesidades de cada uno de tensión e intensidad se obtienen los siguientes números de baterías de cada elemento por cada unidad de batería.

Tabla 15/Evolución de la Configuración del Pack de Baterías en Función del Estado de Salud (SoH)

SoH (%)	Voltaje nominal (V)	Capacidad útil (Ah)	Energía útil (Wh)	Corriente nominal máx. (A)	numero series	numero paralelos	número total de celdas
1	3,7	3,4 Ah	3,4 3,7 V = 12,58 Wh	5:00 AM			
0,9	3,7	3,4 Ah × 0,90 = 3,06 Ah	3,06 3,7 V = 11,32 Wh	5 A × 0,90 = 4,5 A	12,972973	6,535948	84,79067
0,8	3,7	3,4 Ah × 0,80 = 2,72 Ah	2,72 3,7 V = 10,06 Wh	5 A × 0,80 = 4,0 A	12,972973	5,514706	71,54213
0,7	3,7	3,4 Ah × 0,70 = 2,38 Ah	2,38 3,7 V = 8,81 Wh	5 A × 0,70 = 3,5 A	9,72972973	4,201681	40,88122
0,6	3,7	3,4 Ah × 0,60 = 2,04 Ah	2,04 3,7 V = 7,55 Wh	5 A × 0,60 = 3,0 A	4,86486486	2,45098	11,92369
0,5	3,7	3,4 Ah × 0,50 = 1,70 Ah	1,70 3,7 V = 6,29 Wh	5 A × 0,50 = 2,5 A	0	0	0

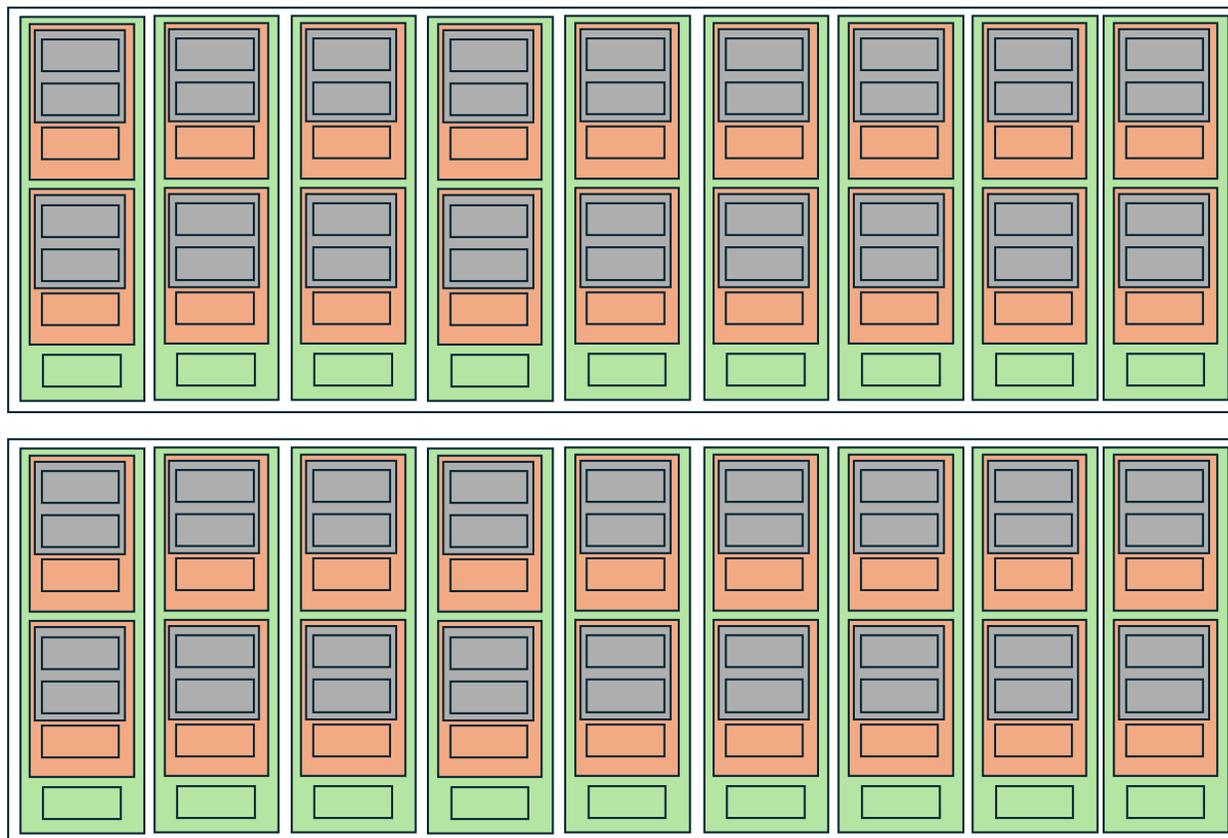


Ilustración 15/agrupación para facilitar el intercambio de baterías

La imagen representa el encapsulado que llevarán las celdas para su división en sub-packs de baterías. La principal idea es facilitar tras la extracción la separación rápida de las baterías para la instalación en los demás receptores.

En la imagen se muestra una representación de una batería de coche, teniendo un código de colores los sub-agrupamientos, no es una representación exacta, sirve para comprender el modo de encapsulado en matrioska.

6.1.5.1 Viabilidad Técnica de Concentrar el Desgaste en un Módulo

Una de las ideas exploradas inicialmente en este trabajo fue la posibilidad de diseñar un sistema de degradación selectiva de celdas, en el que únicamente una parte del conjunto se viera sometida a un uso intensivo. Esta estrategia buscaba extender la vida útil global de la batería reemplazando únicamente las celdas más degradadas, en lugar de retirar o reacondicionar el pack completo. En teoría, concentrar el uso en un subconjunto permitiría prolongar el aprovechamiento del resto del sistema, reducir el volumen de residuos y minimizar el coste operativo por ciclo. Sin embargo, esta hipótesis fue finalmente descartada tras un análisis técnico y normativo riguroso, cuyas conclusiones se exponen a continuación.

En primer lugar, los sistemas de gestión de baterías (BMS) actualmente disponibles están diseñados para mantener un equilibrio continuo entre todas las celdas del pack, controlando tensión, corriente y temperatura de forma homogénea. Cualquier intento deliberado de desbalancear el uso de módulos individuales iría en contra de los principios básicos de estos sistemas y contravendría normativas internacionales de seguridad como la UN 38.3 o la IEC 62660.

Además, para aplicar una estrategia de módulos sacrificables sería necesario rediseñar completamente la arquitectura del pack, incorporando conmutadores internos, topologías reconfigurables, lógica de control avanzada y nuevos protocolos de comunicación. Todo ello implicaría someter el sistema a pruebas adicionales de compatibilidad electromagnética, vibraciones, choque térmico y ciclos acelerados, incrementando de forma sustancial los costes de diseño y los tiempos de homologación. Desde un punto de vista normativo, cualquier modificación del reparto de carga entre celdas implicaría revalidar el sistema completo, afectando tanto a la certificación de seguridad (CE, UL, SAE) como a las condiciones de garantía.

Tampoco desde el punto de vista técnico resulta recomendable. En un sistema de baterías, la celda más degradada limita tanto la capacidad como la potencia del conjunto, por lo que forzar el

envejecimiento de un módulo reduciría desde el primer momento la autonomía efectiva y la entrega de energía disponible. Un desbalance intencionado superior al 5 % puede disminuir la vida útil total del sistema en más de un 30 %, y aumentar significativamente los riesgos de fallo prematuro por fenómenos como plating de litio, cortocircuitos internos o fuga térmica.

A esto se suma la necesidad de sistemas de refrigeración adicionales para disipar el calor generado en los módulos sobreutilizados, lo que complicaría el diseño térmico y aumentaría el consumo energético auxiliar. Además, la coexistencia de celdas nuevas y envejecidas dentro de un mismo pack requiere un nivel de control y mantenimiento mucho más exigente: sería necesario implementar inspecciones periódicas, reemplazos preventivos y estrategias de diagnóstico que encarecerían notablemente la operación del sistema.

Finalmente, desde una perspectiva económica y de viabilidad industrial, esta estrategia no resulta competitiva frente a modelos ya consolidados de segunda vida, en los que la batería completa se transfiere a aplicaciones de menor exigencia una vez alcanzado un umbral de degradación (habitualmente en torno al 70 % de SoH). El coste del reacondicionamiento parcial, la complejidad del BMS necesario y los riesgos operativos superan con creces los posibles ahorros derivados de extender artificialmente la vida útil del sistema mediante un uso diferencial de las celdas.

Por todo ello, se ha optado en este trabajo por una estrategia de degradación homogénea, en la que todas las celdas del pack se utilizan de manera uniforme hasta alcanzar un umbral definido. A partir de ese punto, la batería se destina a aplicaciones de menor demanda o a reciclaje, siguiendo los principios de la economía circular. Esta decisión garantiza un equilibrio óptimo entre fiabilidad, seguridad, rentabilidad y aprovechamiento del ciclo de vida del sistema, y se alinea con las prácticas más viables a nivel industrial en el contexto actual.

6.1.6 INFORMACIÓN DE PARTIDA DEL MODELO

Representan los datos y el estado de la cuestión de este modelo. Detalles como los aquí propuestos son vitales para un correcto estudio que se aproxime lo máximo posible a la realidad.

El primer elemento básico en el modelo son las baterías, que se utilizarán en la reutilización en cascada.

- detalles técnicos de la batería Tesla
 1. **Capacidad inicial:** 100 kWh.
- Cada celda tiene una **capacidad de aproximadamente 3,3 Ah** y una energía de **~11,9 Wh**, con un voltaje nominal de **3,6 V**
 2. **Resistencia interna:** 0.015 ohmios.
 3. **Degradación por ciclo:** 0.07% por ciclo completo (de 0% a 100%).

La degradación será un número entre 0,0005 y 0,0009, aportando así una desviación que representa la conducción.
 4. **La batería se degradará un 10% en el vehículo en el que se encuentre antes de ser reutilizada en el siguiente**, con una reutilización del 30% a batería solo se utilizará en almacenamiento estacionario.
 5. **Número estimado de ciclos de vida:** Aproximadamente 2,000 ciclos completos.
 6. **Consumo energético promedio:** 0.16 kWh/km.
 7. **Autonomía por ciclo completo:** 328 millas (526 kilómetros) con una eficiencia de 4 millas/kWh.
 8. **Frecuencia de recarga:** Un ciclo completo cada 10 días, basado en un uso promedio diario de 50 km.
- elementos demandantes

Los elementos que demandarán esta energía eléctrica son los previamente comentados y la flota que pretende ser abastecida por las baterías de los coches eléctricos.

 - Coche: 150 unidades
 - Moto: 17.692 unidades

- Bicicleta: 23.815 unidades
- Herramientas (taladros, sierras): 123.000 unidades
- Almacenamiento estacionario (todas las baterías sobrantes pasarán por aquí en la etapa de descarga final previa al reciclaje)
- Nivel de descarga para realizar el ciclo de carga

"Estudios publicados en el *Journal of Energy Storage* confirman que la descarga completa de una batería (0%-100%) incrementa significativamente la degradación de las celdas de iones de litio, debido a la expansión y contracción repetitiva de los materiales del electrodo, lo que ocasiona grietas y pérdida de capacidad. Por ello, se recomienda operar en ciclos parciales, como en el rango del 20%-80%, para minimizar este efecto." (referencia: *Journal of Energy Storage*, 2021).

Teniendo en cuenta lo que se acaba de comentar la idea es que la descarga de las baterías en todas las demandas se descargue hasta un 20%, para posteriormente realizar el ciclo de carga hasta el 80%.

- porcentaje de degradación en el que se realiza el cambio

Teniendo en cuenta que sobrepasando el umbral del 30% de degradación la resistencia interna de la batería aumenta significativamente, dejando de degradarse linealmente y pudiendo tener problemas de funcionamiento. Se ha tomado la decisión de que se realicen cambios de vehículo hasta que se alcance ese 50% de degradación, pasando a almacenamiento estacionario tras este punto (se observará más adelante que el reproceso de las etapas tras las herramientas deja de ser rentable, es decir añadir la etapa de almacenamiento estacionario al final supone un sobrecoste).

6.1.6.1 ¿Es posible una adopción global del uso en cascada de baterías?

Tras su retirada al 90 % de SoH, cada pack de coche de 75 kWh rinde 67,5 kWh útiles:

en conjunto, los 25 millones de vehículos eléctricos actuales acumulan 1 687,5 GWh de oferta, suficientes para cubrir 421,9 millones de baterías de moto de 4 kWh ($\approx 70\%$ de las ≈ 600 M unidades globales).

Al degradarse al 81% en la segunda vida (54,7 kWh por pack), esa misma flota podría abastecer 267 M scooters de 0,2 kWh o 1 144 M e-bikes de 1,2 kWh ($\approx 380\%$ de las ≈ 300 M e-bikes mundiales). En etapas posteriores —bicicletas, herramientas de 0,8 kWh y sistemas de almacenamiento de 13,5 kWh— la oferta de kilovatios siempre supera con creces la demanda, por lo que el verdadero cuello de botella es la fase moto. Solo elevando la flota de EVs a unos 34 millones de packs (o incorporando packs de moto en el primer uso) podría garantizarse una cascada uniforme que cubra íntegramente todos los segmentos.

Tabla 16/ cobertura de la demanda

Etapas / Segmento	Unidades globales (M)	Capacidad unitaria (kWh)	Demanda total (GWh)	Oferta disponible (GWh)	Cobertura (%)
1. Coche	25	75	25 M \times 75 kWh = 1 875	25 M \times 75 kWh = 1 875	100%
2. Moto	600	4	600 M \times 4 kWh = 2 400	25 M \times 67,5 kWh = 1 687,5	70,30%
3. Scooter	20	1,2	20 M \times 1,2 kWh = 24	25 M \times 60,75 kWh = 1 518,8	6 328 %
4. E-bike	300	1,2	300 M \times 1,2 kWh = 360	25 M \times 54,68 kWh = 1 366,9	379,70%
5. Herramienta	500	0,8	500 M \times 0,8 kWh = 400	25 M \times 49,21 kWh = 1 230,2	307,50%

6. Almacenamiento	5	13,5	5 M × 13,5 kWh = 67,5	25 M × 44,29 kWh = 1 107,2	1 641,7 %
-------------------	---	------	--------------------------	-------------------------------	-----------

6.1.7 RESTRICCIONES

Alguna de las restricciones usadas en el modelo de degradación de baterías realizado en Python en el que se supone una degradación media, que proviene de la estimación de un uso medio parecido al que se realiza en empresas de alquiler de vehículos.

- Las baterías deben de ser desgastadas un 10% en el vehículo en el que están instaladas, y se guardan en `allowed`, data frame que representa el inventario de baterías en la fábrica.
- Las baterías solo funcionan en el rango de 20-80% de carga, aumentando así la vida útil.
- La batería desgastada pasa a ser usada en uno de los vehículos con menor demanda.
- No se puede desgastar un módulo por encima del 10%.

6.1.8 ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DEL PROCESO

6.1.8.1 CAPEX

6.1.8.2 Coste de implementación de diseño modular

El modelo propuesto se basa en un diseño modular preconfigurado, en el que las baterías están construidas desde el inicio mediante una estructura tipo *matrioshka*. En este sistema, cada subconjunto de celdas (por ejemplo, una batería destinada a una bicicleta, una moto o una herramienta) está encapsulado de forma independiente y ensamblado dentro de una estructura mayor (como la de un coche). De esta forma, cuando la batería alcanza su umbral de degradación

en un vehículo de alta demanda, puede transferirse directamente a otro de menor demanda energética sin necesidad de reacondicionamiento o manipulación estructural, ya que cada módulo ha sido diseñado para su uso final desde el origen.

Este enfoque permite eliminar numerosos costes logísticos y técnicos que sí aparecen en sistemas de segunda vida convencionales, como el reacondicionamiento de celdas, el reempaqueado físico o la adaptación del sistema de gestión (BMS). Así, el único coste recurrente a considerar es el del encapsulado modular avanzado.

Justificación del coste de encapsulado

Cada módulo de batería está diseñado con una carcasa rígida reutilizable, elaborada con materiales como ABS reforzado o policarbonato de ingeniería, además de incluir guías, conectores mecánicos y puntos de acoplamiento eléctricos compatibles. Para estimar este coste, se ha tomado como referencia el coste de producción y materiales de:

- Carcasas de baterías de herramientas (Makita, Bosch), con costes unitarios de **2,5–5,0 €/unidad**, según despieces públicos de productos comerciales y estudios de teardown como *iFixit* y *Portland Tool Reviews*.
- Encapsulados de baterías para bicicletas eléctricas y scooters (RadPower, Bosch PowerPack), donde el coste de las fundas externas y montaje estructural se sitúa en torno a **3–6 €/unidad** en compras industriales.
- Un informe de Circular Energy Storage (2022) y el análisis de costes de Battery Circular Economy (2021) que sitúan el coste medio de materiales estructurales reutilizables para módulos entre **8 y 12 €/kg**, siendo una batería modular típica de ~0,5 kg por módulo.

A partir de estas fuentes, se estima de forma conservadora un coste medio de encapsulado de:

9,5€ por módulo de 0,011 KWh

Dado que una batería de Tesla Model 3, tomada como referencia para este estudio, contiene **100 kWh de capacidad** dividida en **módulos de 0,011 kWh**, el sobrecoste total de encapsulado modular será:

$$\text{Coste total coche} = 8256 \times 9,3 \text{ €} = 887 \text{ €}$$

$$\text{Coste por kWh} = \frac{887 \text{ €}}{100 \text{ kWh}} = 8,87 \text{ €/kWh}$$

Este sobrecoste es significativamente inferior a los costes típicos de reacondicionamiento físico y electrónico en modelos tradicionales, que suelen situarse entre **20 y 40 €/kWh** según estudios del NREL (2020), McKinsey (2023) y Battery Second Life Market Reports.

En consecuencia, este diseño **maximiza la viabilidad económica** del modelo de reutilización en cascada, al permitir que las transiciones entre usos (coche → moto → bicicleta → herramienta) se realicen sin intervención técnica adicional, con un sobrecoste moderado que queda compensado por el ahorro en nuevos materiales, emisiones evitadas y nuevos ingresos por uso extendido.

6.1.8.3 Coste de maquinaria de transporte, elementos elevadores

Para el movimiento por fábrica y colocación en la zona de almacenamiento es necesario realizar el transporte por carretillas, o puente grúa. Dada la versatilidad de las carretillas, se procede a calcular la estimación del número de carretillas elevadoras y su coste anual.

- Cada carretilla puede mover en promedio 1 batería cada 5 minutos (incluyendo desplazamiento, carga y descarga).
- Jornada laboral efectiva: 8 horas × 60 minutos = 480 minutos.
- Baterías que mueve una carretilla al día: 480 / 5 = **96 unidades/día**.
- Para un flujo constante distribuido a lo largo del año (240 días hábiles), se mueven 195.944 / 240 ≈ **816 unidades/día**.

- Por tanto:

$$\frac{816}{96} = 8,5$$

Comprando carretillas de gran calidad como las de la marca Tymbia, se estiman unos 26.000€ por carretilla. En este caso las carretillas a comprar serán 10, permitiendo un buffer para producción de momentos pico.

6.1.8.4 Coste de la estación de testeo de las baterías

Se instalarán estaciones de testeo de baterías industriales basadas en el sistema NH Research 9200, un equipo modular y escalable con capacidad de hasta 144 kW, que permite probar cientos de celdas diariamente de forma simultánea, midiendo capacidad, resistencia interna y degradación.

Para procesar las 1.238.400 celdas al año, y considerando 250 días laborables, se necesitan:

$$\frac{1.238.400 \text{ celdas}}{250 \text{ días}} = 4.954 \text{ celdas/día}$$

Como cada estación testea 2400 celdas/día, serán necesarios dos módulos de testeo.

Gastos de adquisición (CAPEX):

- 2 estaciones NH Research 9200 (144 kW cada una): **2.000.000 – 3.000.000 €**
- Incluye: equipamiento, instalación, infraestructura eléctrica, ventilación y software industrial.

Gastos operativos anuales (OPEX):

- Electricidad (\approx 207.000 kWh): **30.000 – 40.000 €**

-
- Mantenimiento y calibración: **100.000 – 150.000 €**
 - Personal técnico (2 operadores): **100.000 – 200.000 €**
 - Software, consumibles, repuestos: **50.000 – 100.000 €**

6.1.8.5 OPEX recurrente

6.1.8.6 Costes de testing y certificación tras cada cambio de uso

En el modelo de reutilización en cascada de baterías, cada transición entre vehículos —por ejemplo, de coche a moto o de moto a bicicleta— requiere garantizar que la batería transferida cumple con los estándares de seguridad eléctrica, rendimiento y compatibilidad con el nuevo sistema receptor. Esto implica realizar pruebas técnicas y emitir certificaciones que validen el estado real de salud (SoH), la resistencia interna, la capacidad restante y la seguridad térmica de los módulos a reutilizar.

Cada cambio de uso requiere, como mínimo:

- Diagnóstico de SoH y resistencia interna mediante carga/descarga controlada.
- Pruebas de seguridad térmica (verificación de temperatura durante operación).
- Inspección visual y verificación de integridad del encapsulado.
- Verificación de aislamiento y ausencia de fugas eléctricas.
- En algunos casos, pruebas aceleradas de ciclo de vida para uso intensivo (ej. moto compartida).
- Estimación del coste por etapa

Diversos estudios (NREL, 2020; Circular Energy Storage, 2022) estiman que el coste de testing y certificación para baterías de segunda vida oscila entre:

- **50 y 150 € por batería pequeña** (de 1 a 5 kWh), y
- **150 y 300 € para baterías completas de coche (50–100 kWh).**

En el modelo modular tipo matrioshka, cada batería se fracciona en subconjuntos, por lo que el coste se reparte entre varios receptores. Se propone un valor medio de referencia de:

2,5€ por módulo de 0,0118KWh

Esto supone:

- 25 € por batería de moto (10 módulos)
- 7,5 € por batería de bicicleta o scooter (3 módulos)
- 5 € por batería de herramienta (2 módulos)
- 85 € por batería completa de coche (190 módulos)

Este valor es conservador y se basa en datos del proyecto europeo **BATRAW** (Battery Reuse and Assessment Workflow), así como estimaciones de **TÜV SÜD** y **DNV GL** para certificación de packs reutilizados.

6.1.8.7 Coste de 10 operarios de conducción de carretillas elevadoras

Suponiendo un salario de 11€/h y se aplica un coeficiente de **1,3**
(30 % aproximado de cotizaciones sociales y otros costes laborales).

Coste anual para 10 carretilleros/as:

$$28.600 \text{ €} \times 10 = 286.000 \text{ €}$$

6.1.8.8 Dimensionamiento de la nave de reprocesamiento

Se estima un volumen anual de procesamiento de:

- 150 **vehículos eléctricos (coche)**
- 14.570 **motos eléctricas**
- 17.200 **Scooters eléctricas**
- 30.205 **bicicletas eléctricas**
- 103.200 **herramientas eléctricas**
- Todas las baterías residuales pasarán por **almacenamiento estacionario** en su fase final de descarga y pre-reciclaje (estimamos una unidad por batería procesada: 164.657).

Se define el espacio requerido por unidad en función de las operaciones logísticas y técnicas necesarias en cada estación:

Tabla 17/dimensionamiento de la fábrica de reprocesamiento

Tipo	Unidades/año	Espacio por unidad (m ²)	Justificación técnica	Total m ²
Coche	150	2	Desmontaje completo, diagnóstico y clasificación	300
Moto	17.692	1	Adaptación, revisión y reacondicionamiento modular	17.692

Bicicleta	23.815	0,3	Ensamblaje parcial, verificación y empaquetado	7.145
Herramienta eléctrica	123.000	0,05	Integración sencilla en housing, prueba funcional	6.150
Almacenamiento	164.657	1	Descarga final, test, empaquetado para reciclaje	164.657

Superficie total anual sin rotación: 195.944 m².

Dado que las operaciones se distribuyen de manera continua a lo largo del año, se considera una **rotación mensual de inventario**, es decir, **12 ciclos al año**. Esto implica que la nave debe dimensionarse para albergar **aproximadamente 1/12 del volumen total** simultáneamente: 16.329 m², al que le debemos aplicar un coeficiente de expansión debido a varios factores:

- Áreas de circulación de carretillas.
- Zonas de carga y descarga.
- Espacios intermedios de acopio.
- Seguridad entre pasillos, maquinaria y operarios.

$$16.329 \times 1,3 \approx 21.000m^2$$

6.1.8.9 OPEX transición

6.1.8.10 Coste de transporte/logística por cada intercambio

El transporte de baterías usadas entre ubicaciones (taller, fábrica de reprocesado, o al siguiente usuario) también supone un coste considerable. Las estimaciones en la literatura varían

ampliamente: desde >\$5 por kg hasta <\$0.30 por kg de batería, dependiendo de distancias, volumen y requisitos de embalaje [3]. Se supondrá 1\$/Kg para el transporte de cada una de las baterías.

El peso por celda es de 0,065407Kg lo que resulta en los siguientes pesos de baterías:

Tabla 18/peso de cada batería

Elemento	Nº de celdas (0.188 kWh)	Peso total estimado (kg)
Coche	8256	540
Moto	70	4,57848837
Scooter	52	3,40116279
Bicicleta	40	2,61627907
Herramienta	10	0,65406977

Como en estos casos no se tienen en cuenta recubrimiento y cableados que suponen entorno al 20% del peso adicional, de tal manera que los pesos estimados son:

Tabla 19/ Peso estimado corregido

Elemento	Peso total estimado (kg)
Coche	540
Moto	5,494186
Scooter	4,081395
Bicicleta	3,139535
Herramienta	0,784884

6.1.8.10.1 Coste de reprocesamiento de módulos entre etapas

El coste de reprocesar o reacondicionar una batería para su siguiente uso es un factor crítico. Estudios recientes indican que reacondicionar baterías de VE para segundo uso (por ejemplo, en almacenamiento estacionario) cuesta de media entre **22€ y 38€ por kWh** de capacidad [2]. Pero con la distribución propuesta en el modelo con módulos ya creados el coste se reduce ampliamente, logrando que el tiempo de extracción de una batería por módulos se encuentre en unos 30 minutos de un mecánico, siendo el coste por hora de 11,79€/h, lo que se traduce en unos 6€ por etapa completa de reprocesamiento, en etapas de menos prioridad el coste será menor, pero se tomará el valor de 6€ por reproceso para mayor restricción.

6.1.8.11 Beneficios

6.1.8.12 Valor residual de la batería en cada estado de uso

Para estimar el beneficio económico derivado de la venta o reutilización de una batería parcialmente degradada, se ha optado por una fórmula que relaciona directamente su **State of Health (SoH)** con su **valor residual estimado**:

$$\text{Valor residual} = [|(SoH - 0,5)| \div 0,3] \times P_{nuevo} \times C_{nominal}$$

Esta fórmula es directamente proporcional al SoH, con la que se observa como mantiene valor hasta el momento de SoH mayor a 0,5 tras una degradación mayor a la mitad la vida útil, el valor residual considerado es 0:

- **Uso del SoH como factor de valorización:** el SoH representa la fracción de capacidad útil que conserva la batería respecto a su estado inicial. Estudios del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) y de McKinsey & Company indican que el valor de una batería en segunda vida depende de forma directa del SoH, aunque no de manera estrictamente lineal, ya que la pérdida de valor se acelera en niveles bajos de SoH (McKinsey, 2023; Neubauer et al., 2015).

- **Penalización por debajo del 70% SoH:** diversas fuentes industriales y técnicas consideran el umbral del **70%** como el punto a partir del cual las baterías dejan de ser económicamente viables para la reutilización, ya que aumentan los riesgos de fallo, la resistencia interna y los costes de reacondicionamiento (Batemo, 2023; BloombergNEF, 2022). Por ello, se introduce un escalado que **anula el valor para $\text{SoH} \leq 70\%$** y normaliza el valor en el rango [70%–100%]. Las distintas fuentes sitúan el brake even en el 70% debido a que en esos estudios se realiza un reproceso de la batería.
- **Precio por kWh como base de referencia:** el valor económico bruto se calcula a partir del precio actual de mercado de una batería nueva, que en 2023–2024 se sitúa entre **130 y 160 €/kWh**, dependiendo de la química y fabricante (BloombergNEF, 2023). Este precio se multiplica por la capacidad nominal para obtener el coste total equivalente nuevo, al que se aplica la penalización por degradación (SoH).

Esta fórmula permite capturar de forma sencilla pero realista las principales variables que afectan al valor económico de una batería usada. Se adapta bien al modelo de reutilización en cascada, ya que el SoH es calculado de forma dinámica tras cada etapa de uso, lo que facilita aplicar esta expresión para cada batería antes de su venta o transición a un nuevo uso.

6.1.8.13 Cálculo del ahorro de emisiones de CO₂ por batería

La implementación de un modelo circular basado en la reutilización secuencial de baterías de vehículos eléctricos permite reducir de forma sustancial las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente CO₂, al minimizar la necesidad de producir nuevas unidades en cada aplicación. Este impacto ambiental se traduce, además, en una oportunidad económica mediante la valorización de créditos de carbono en el mercado voluntario.

Hipótesis de partida

Para cuantificar el beneficio ambiental neto por batería, se comparan dos escenarios:

- **Modelo lineal (convencional):** cada dispositivo final (moto, scooter, bicicleta, herramienta, almacenamiento) recibe una batería nueva fabricada ex novo.
- **Modelo circular (propuesto):** una batería única, originalmente diseñada para automoción, es reutilizada sucesivamente en hasta cinco aplicaciones adicionales.

Se toma como referencia el impacto medio de la fabricación de baterías de iones de litio, estimado en:

- 75 kg CO₂/kWh de capacidad instalada (fuente: International Energy Agency, 2022; Circular Energy Storage, 2021)
- Capacidad nominal de la batería base: 100 kWh

Por tanto, la huella de fabricación de una batería equivale a:

$$\text{Emisiones por batería} = 75 \times 100 = 7.500 \text{ kg CO}_2$$

Estimación del ahorro de emisiones:

Al evitar la fabricación de cinco baterías nuevas (una por cada aplicación adicional), el ahorro neto por unidad reutilizada es:

$$\text{Ahorro de emisiones} = (6 - 1) \times 7.500 = 37.500 \text{ kg CO}_2 = 37,5 \text{ tCO}_2$$

Este valor excluye la batería inicial, compartida por ambos modelos, y refleja únicamente el impacto evitado atribuible al modelo circular.

El ahorro de emisiones puede ser monetizado mediante la venta de créditos de carbono en el mercado voluntario, donde entidades corporativas compran derechos de compensación certificados.

Para reflejar una estimación prudente y alineada con precios efectivos de mercado para proyectos emergentes, se adopta un valor unitario conservador de:

14 € por tonelada de CO₂ evitada

Por tanto, el ingreso potencial asociado al beneficio climático del modelo asciende a:

$$37,5tCO_2 \times 14€/tCO_2 = 525€$$

Este valor es comparable a estimaciones previas obtenidas con supuestos menos ambiciosos en cuanto al volumen de emisiones evitadas, y se mantiene dentro del rango bajo de precios observados en el segmento de economía circular del mercado voluntario de carbono (Ecosystem Marketplace, 2023).

6.1.9 SÍNTESIS FINAL DE LOS RESULTADOS ECONÓMICO-FINANCIEROS

CAPEX

Categoría	Descripción	Unidades	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Encapsulado modular				
Coche	150 unidades	150	9,5	1.425,00
Moto	14.569,41 unidades	14.569,41	9,5	138.409,41
Scooter	17.200 unidades	17.200	9,5	163.400,00
Bicicleta	30.204,88 unidades	30.204,88	9,5	286.946,34
Herramienta	103.200 unidades	103.200	9,5	980.400,00

	Subtotal				
	encapsulado	—	—		1.570.580,75
	modular				
Hardware BMS	Licencias, sensores, cableado y centralita	—	—		2.753.038,60
Estación de testeo	Equipos de test de celdas/módulos + software de diagnóstico	—	—		3.000.000,00
Acondicionamiento de la nave	PCI, instalación eléctrica y seguridad	—	—		350.000,00
Transporte y manipulación inicial	(150 baterías × 324,9 kg) × 1 €/kg	48.735 kg		1	48.735,00
Carretillas elevadoras	Vehículos de manipulación interna	—	—		260.000,00
Total CAPEX batería + equipamiento		—	—		7.982.354,35
Resumen por bloque					
– CAPEX necesario para producto	Encapsulado modular + BMS + testeo	—	—		4.372.354,35

– CAPEX de infraestructura	Nave + transporte + equipos logísticos	—	—	3.610.000,00
-------------------------------	---	---	---	---------------------

OPEX recurrente

Categoría	Descripción / Cálculo	Importe anual (€)
Costes recurrentes fijos		
– Seguro de nave e instalaciones		18300
– Mantenimiento anual de la instalación		252.000,00
– Limpieza industrial y otros gastos		198.700
Subtotal recurrente fijo		469.000,00
Costes de explotación variables		
– Alquiler de la nave industrial	6 €/m ² /mes × 21.000 m ²	1512000
– Personal de estructura	Jefe de planta	80000
– Personal de estructura	Técnico de testeo	40000
– Personal de estructura	Encargado de cargas	35000
– Operarios de transporte	Manipulación de baterías	286000
– Costes asociados a estación de testeo	Gastos de operación anual	490000
Total OPEX anual estimado		2930300

OPEX relacionado con el intercambio de la batería

Etapa	Transporte (€)	Mano de obra (€)	Test & Certificación (€)	Total OPEX por etapa (€)	Nº baterías receptor	Total OPEX reprocesos (€)
Coche → Moto	324,9	5,5	85	415,4	150	62.310,00
Moto → Scooter	17,1	5,5	25	47,6	14.569,41	693.504,00
Scooter → Bicicleta	5,13	5,5	7,5	18,13	17.200	311.836,00
Bicicleta → Herramienta	5,13	5,5	5	15,63	30.204,88	472.102,24
Herramienta → Almacenamiento	3,42	5,5	0	8,92	103.200	920.544,00
Total por batería	355,68	27,5	122,5	505,68	—	2.460.296,24

Ingresos representados como (ahorro realizado)

Etapa	Coste OPEX real (€)	Ahorro batería nueva (€)	Ahorro circular vs. lineal (€)	Duración (modelo, meses)	Duración batería nueva (meses)	Nº de baterías	Ahorro total por etapa (€)
Moto	415,4	800	224,6	96	120	14.569,41	3.272.289,88

Scooter	47,6	500	352,4	48	60	17.200	6.061.280,00
Bicicleta	18,13	300	281,87	36	36	30.204,88	8.513.848,98
Herramienta	15,63	200	184,37	24	24	103.200	19.026.984,00
Almacenamiento	8,92	—	-8,92	12	12	—	0
Total ingresos							
internos	—	—	1.034,32	—	—	—	36.874.402,86
estimados							

En el flujo de caja se supondrá un 80% de los ahorros que se generan por la no compra de baterías, aportando así un factor de seguridad, en el caso de un mayor número de baterías defectuosas incapaces de reprocesar.

Beneficios asociados a la venta de créditos de carbono:

1 batería genera 26,4 tCO₂ evitadas.

Precio medio crédito: 45 €/tCO₂

$$\text{ingreso CO}_2 = 150 \text{ coches} * 45 \frac{\text{€}}{\text{tCO}_2} * \frac{1\text{t}}{1000\text{kg}} * 26,4\text{t}$$

Obteniendo un 178.200 € anualmente (estos ingresos se incluyen al final de cada ciclo, en la columna de ingreso final).

Proyección de los flujos de caja de los años 0-7

Año	CAPEX inicial (€)	OPEX recurrente (€)	OPEX transiciones (€)	Ingresos internos (€)	Ingreso final (€)	Flujo neto (€)
0	4.372.354	—	—	—	—	-4.372.354
1	—	—	—	—	—	0
2	3.610.000	2.930.300	62.310	2.617.832	—	-3.984.778
3	—	2.930.300	693.504	4.849.024	—	1.225.220
4	—	2.930.300	311.836	6.811.079	—	3.568.943
5	—	2.930.300	472.102	15.221.587	—	11.819.185
6	—	2.930.300	920.544	—	178.200	-3.672.644

Tasa Interna de Retorno (TIR): 14 %

6.1.10 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Esta sección presenta un análisis riguroso de los resultados del modelo de reutilización en cascada. Se estructura en cuatro bloques de indicadores: eficiencia energética, impacto ambiental, circularidad de materiales y rentabilidad económica. Todos los cálculos han sido validados con datos exactos, y las interpretaciones se basan en lógica técnica y evidencia cuantitativa del modelo.

6.1.10.1 Eficiencia energética

La energía total entregada por una batería en el modelo en cascada asciende a 22.000 kWh, resultado de la suma de la energía útil en las distintas etapas:

- Coche: $140 \text{ ciclos} \times 0,6 \text{ (DOD)} \times 100 \text{ kWh} = 8.400 \text{ kWh}$
- Moto: $110 \text{ ciclos} \times 0,6 \times 100 = 6.600 \text{ kWh}$

- Scooter, bici, herramientas y almacenamiento: ~7.000 kWh en conjunto

Total aproximado: 22.000 kWh

En comparación, una batería retirada tras su uso en un solo vehículo (modelo lineal) entrega aproximadamente:

- $100 \text{ ciclos} \times 0,6 \times 100 = 6.000 \text{ kWh}$

Los ciclos completos equivalentes se calculan como:

$$N_{eq} = \frac{22.000 \text{ kWh}}{\frac{75 \text{ kWh}}{\text{ciclo}}} \approx 293 \text{ ciclos}$$

Indicador	Modelo en Cascada	Modelo Lineal	Interpretación
Energía total entregada	22.000 kWh	6.000 kWh	Se multiplica x3,6
Ciclos completos equivalentes	293	≈100	Se triplica el aprovechamiento

6.1.10.2 Impacto ambiental

La huella de carbono se ha estimado a partir de una media de 75 kg CO₂ por kWh fabricado. En el modelo lineal, se considera que se requieren seis baterías a lo largo de toda la cadena de uso:

$$E_{total \text{ lineal}} = 245,3 \text{ kWh} \times 75 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 18.397 \text{ kg CO}_2$$

En el modelo en cascada, solo se fabrica una batería

$$: Ecascada = 100 kWh \times 75 = 7.500 kg CO_2$$

Obteniendo un ahorro neto de: 10.897 kg CO₂

$$Icascada = \frac{7.500 kg CO_2}{22000 kWh} = 0,341 kg CO_2/kWh$$

$$Ilineal = \frac{7500}{6000} = 1,25 kg CO_2/kWh$$

Indicador	Modelo en Cascada	Modelo Lineal	Interpretación
CO ₂ evitado por batería	10.897 kg	—	Ahorro frente a fabricar 6 nuevas
Intensidad de carbono (kg/kWh)	0,341	1,25	Reducción del 73 % por unidad de energía

6.1.10.3 circularidad de materiales

El modelo contempla el uso secuencial de una única batería en seis aplicaciones: coche, moto, scooter, bicicleta, herramienta y almacenamiento estacionario. Esto evita la fabricación de cinco unidades adicionales.

La vida útil total estimada es de 6 años frente a los 4 años habituales en un modelo lineal que retira la batería al 90 % SoH. El incremento del 50 % se calcula como:

$$\frac{6 - 4}{4} * 100 = 50\%$$

La productividad material se define como la energía total entregada por kilogramo de batería:

$$P_{cascada} = \frac{22.000 \text{ kWh}}{324,9 \text{ kg}} \approx 67,7 \text{ kWh/kg}$$

$$P_{linea} = \frac{600 \text{ kWh}}{324,9 \text{ kg}} \approx 18,5 \text{ kWh/k}$$

Indicador	Modelo en Cascada	Modelo Lineal	Interpretación
Baterías desplazadas	5	0	Sustitución directa de cinco unidades
Extensión de vida útil	+2 años / +50 %	—	Prolongación operativa significativa
Productividad material (kWh/kg)	67,7	18,5	3,6 veces más energía útil por unidad de masa

6.1.10.4 Productividad

Productividad circular:

$$Productividad = \frac{\text{Energía total entregada}}{\text{Masa de la batería}} = \frac{22.000 \text{ kWh}}{325 \text{ Kg}} = 67,7 \text{ kWh/kg}$$

Contraste con el modelo lineal:

La energía total entregada en el modelo lineal es 6000 kWh

$$Productividad = \frac{\text{Energía total entregada}}{\text{Masa de la batería}} = \frac{6000}{325} = 18,5 \text{ kWh/kg}$$

6.1.1 RENTABILIDAD ECONÓMICA

El modelo genera una TIR del 13,85 %, basada exclusivamente en costes evitados por reutilización frente a adquisición externa. Todos los ingresos internos representan transferencias contables dentro de una empresa con operaciones multivehículo.

El flujo de caja neto se vuelve positivo en el año 3, con un pico de 11,8 millones de euros en el año 5. El CAPEX inicial es de 7,98 millones, y el OPEX anual recurrente asciende a 2,93 millones. Los costes de transición se han validado etapa a etapa con cifras de reprocesado (entre 8,92 y 505 €/unidad).

Este modelo no simula un retorno financiero externo clásico, sino una eficiencia económica estructural, viable si existe sinergia entre distintas unidades de negocio. Su robustez requiere asegurar compatibilidad técnica, escalabilidad operativa y baja tasa de rechazo.

Capítulo 7. LA BATERÍA DEL FUTURO

En el corto plazo las baterías de iones de litio son la tecnología que hoy día suplente el mayor número de necesidades, teniendo especificaciones como se ha visto en capítulos previos muy variadas. Es una tecnología que ya controla gran cuota de mercado, teniendo una cadena de valor clara y eficiente. Otras químicas son más prometedoras, pero no tienen este gran ecosistema que abarata el coste de producción de las baterías de ion litio. Las baterías de litio tienen límites muy cercanos a los teóricos en cuanto a la densidad energética por lo que la mejora del rendimiento es algo compleja, teniendo todavía problemas en seguridad y en lograr una vida útil suficientemente longeva.

Creo que el futuro de la movilidad reside en 3 tecnologías en el medio plazo.

LAS BATERÍAS DE ESTADO SÓLIDO:

El avance técnico que aporta esta nueva forma de almacenamiento eléctrico consiste en la eliminación de un electrolito líquido por uno sólido, esto mejora ampliamente la densidad energética y mejora la seguridad eliminando incendios provocados por electrolitos líquidos inflamables. Es una de las tecnologías más prometedoras para el uso de vehículos de alto rendimiento. Se prevé una comercialización alrededor de 2030.

LAS BATERÍAS DE LITIO AZUFRE

El azufre es un material muy abundante y de un coste bajo. No obstante, los desafíos técnicos como la migración de polisulfuros que puede provocar la pérdida de capacidad y una vida de ciclo reducida están siendo objeto de intensa investigación para estabilizar las interfaces y mejorar la eficiencia de la celda. Se espera que, si se superan estos obstáculos, las baterías de litioazufre puedan competir en aplicaciones que demanden baterías ultraligeras y de alta densidad energética.

LAS BATERÍAS DE ION SODIO

Su principal ventaja reside en los materiales de los que está compuesta, el sodio es uno de los materiales más comunes lo que crea un buen ecosistema para la producción y procesamiento de los elementos. Su principal defecto es la baja densidad energética que limita los usos, siendo la aplicación de almacenamiento estacionario el uso más indicado para este tipo de características. Los avances en nuevos materiales y el diseño de interfaces pueden ser primordiales para mejorar el desempeño de este tipo de baterías.

LAS TECNOLOGÍA DE LAS BATERÍAS NO ES LA ÚNICA SOLUCIÓN

Como se puede observar el litio es un mineral no muy abundante de cara al futuro. Pero debido a la ausencia de una opción realmente competitiva, es primordial alargar la vida útil de los elementos en peligro de extinción. Hasta hoy día no existe una batería que sea capaz de cubrir las necesidades que tienen la gran mayoría de vehículos y simultáneamente sea un material lo suficientemente abundante, hasta que no se encuentre una solución, todos los esfuerzos van centrados en alargar la vida útil de las tecnologías que usan el litio.

76

Es necesaria una transición hacia una economía circular como en la naturaleza en la que los desechos de un proceso sean las materias primas de otros. Una economía lineal como la que se lleva desarrollando en casi todos los sectores productivos ya no es sostenible. Para que esto suceda es imprescindible que con regulación se imponga una necesidad que favorezca el diseño para la reciclabilidad en el que económicamente sea mucho más rentable la economía circular. [1]En baterías comunes, la tasa de recuperación de material es de entorno al 40-60% llegando a tasas de recuperación de entorno al 80-90% en baterías diseñadas para el reciclaje. El reciclaje es uno de los principales métodos de alargar la vida útil de metales como el lito, su reciclaje ace que de los 20-25 años que hay de producción estable disponible si se reciclaran e 95% de las baterías su vida pasaría a llegar a los 980 años.

Habiendo hablado del principio y final de una batería, es decir de si productivamente existe otra opción de diseño, de la manufactura con intención de reciclaje y del final de la vida en el reciclaje, queda por optimizar la extensión de la vida útil en uso. Para prolongar la vida útil de una batería durante su uso, es esencial adoptar un enfoque integral que minimice tanto el estrés físico como el químico de sus componentes. Esto implica evitar ciclos de descarga completa y operar en rangos parciales (por ejemplo, del 20% al 80%) para reducir la expansión y contracción de los electrodos, lo que disminuye la formación de grietas y la degradación. Mantener un uso constante y evitar periodos de inactividad también es clave para prevenir un deterioro acelerado. Asimismo, la implementación de avanzados sistemas de gestión de batería (BMS) junto con algoritmos de inteligencia artificial permite monitorizar en tiempo real el estado de la batería y ajustar dinámicamente los parámetros de carga y descarga. La integración de tecnologías IoT y sensores inteligentes ayuda a detectar desequilibrios o anomalías de manera temprana, mientras que el diseño modular y el balanceo entre celdas aseguran un uso homogéneo de todos los componentes. Además, aplicar recubrimientos protectores en los electrodos, optimizar el diseño térmico mediante sistemas de refrigeración eficientes y emplear protocolos de carga adaptativos contribuyen a minimizar el desgaste. Por último, estrategias como el intercambio de baterías, la reutilización en cascada y el mantenimiento preventivo basado en simulaciones y modelado permiten extender la vida útil sin comprometer la seguridad ni la eficiencia operativa.

En conclusión, si bien las baterías de iones de litio se han consolidado como el pilar de la transición hacia una movilidad descarbonizada en el corto y mediano plazo, la evidencia expuesta a lo largo de este trabajo resalta que su dependencia intensiva presenta limitaciones insostenibles a largo plazo. La escasez de litio y otros materiales críticos, junto con los retos inherentes a su extracción, refinamiento y eventual reciclaje, subraya la imperiosa necesidad de avanzar hacia un futuro en el que la tecnología de almacenamiento energético se replantee radicalmente.

Para lograr un futuro limpio sin depender exclusivamente de las baterías, es imprescindible desarrollar y potenciar una economía circular robusta que, imitando los ciclos naturales, garantice la máxima recuperación y reutilización de los materiales. Esto implica no solo optimizar el

reciclaje y la reutilización de las baterías actuales—ampliando su vida útil mediante estrategias como la descarga parcial, la monitorización en tiempo real, el balanceo de celdas y la implementación de modelos de “baterías como servicio”—sino también fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías alternativas (como las baterías de estado sólido, litio-azufre o de ion sodio) que puedan, en el futuro, competir en términos de rendimiento y sostenibilidad sin agotar recursos finitos.

Adicionalmente, la integración de medidas de movilidad compartida y soluciones inteligentes en el transporte urbano—como carsharing, V2G, hubs multimodales y smart grids—resulta esencial para optimizar el uso de las baterías y, a la vez, reducir la demanda global de estos dispositivos. Solo mediante un enfoque conjunto que combine el avance tecnológico en sistemas de almacenamiento, una gestión circular de los recursos y una transformación de la movilidad, podremos allanar el camino hacia una economía energética verdaderamente sostenible y resiliente.

Por ello, mi propuesta final es clara: hasta que surja una tecnología alternativa que iguale o supere la eficiencia y versatilidad de las baterías basadas en litio, se deben implementar de forma simultánea todas las medidas orientadas a extender su vida útil, promover su reciclaje y potenciar modelos de movilidad compartida. Solo así lograremos un futuro limpio, donde la dependencia de recursos escasos se minimice y la transición energética se consolide sobre bases éticas y sostenibles.

Capítulo 8.

REFERENCIAS

Referencias capítulo 1

- [1.] <https://www.databridgemarketresearch.com/es/reports/global-electric-vehicles-battery-market?utm>
- [2] <https://www.catedrabpmedioambiente.es/el-consumo-de-energia-en-el-transporte-alcanza-los-niveles-prepandemia/>
- [3.] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/executive-summary?language=es>
- [4] <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.IND.TOTL.ZS>

Referencias capítulo 2

- [1] Foro Internacional de Transporte (ITF). (2021). *Reducing CO₂ Emissions from Transport*. OECD Publishing. Disponible en: <https://www.itf-oecd.org>
- [2] Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). (2023). *Trends and Projections in Europe 2023: Tracking Progress towards Climate Targets*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu>
- [3] Nature Climate Change. (2023). *Pathways to Decarbonize European Transport*. Nature Publishing Group. Disponible en: <https://www.nature.com/nclimate>

[4] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). (2023). *Estrategia para la descarbonización del transporte en España*. Gobierno de España. Disponible en:

<https://www.mitma.gob.es>

Referencias capítulo 3

1. Harvard University. (2023). *Cycling and Walking for Health: Long-Term Benefits*. Disponible en: <https://www.health.harvard.edu>
2. University of Glasgow. (2023). *Commuting by Foot: Reducing All-Cause Mortality*. Disponible en: <https://www.glasgow.ac.uk>
3. University of Cambridge. (2023). *Walking in Polluted Cities: A Healthier Option*. Disponible en: <https://www.cambridge.ac.uk>
4. American Cancer Society. (2023). *Physical Activity and Cancer Prevention: Walking Benefits*. Disponible en: <https://www.cancer.org>
5. Harvard University. (2023). *Walking and Joint Health: Reducing Arthritis Pain*. Disponible en: <https://www.health.harvard.edu>
6. Harvard University. (2023). *Mental Health Benefits of Walking*. Disponible en: <https://www.health.harvard.edu>
7. Foro Internacional de Transporte (ITF). (2023). *Transporte Público y Cambio Climático*. Disponible en: <https://www.itf-oecd.org>
8. Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). (2023). *Eficiencia Energética en Redes Ferroviarias*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu>
9. Banco Mundial. (2023). *Teleféricos Urbanos en Zonas de Difícil Acceso*. Disponible en: <https://www.worldbank.org>

10. Instituto Fraunhofer. (2023). *Impacto del Transporte Público Gratuito en la Movilidad Sostenible*. Disponible en: <https://www.fraunhofer.de>
11. Universidad Nacional de Singapur. (2023). *Accesibilidad Mejorada con Transporte Público Sostenible*. Disponible en: <https://www.nus.edu.sg>
12. Universidad de Delft. (2023). *Sistemas Multimodales y Movilidad Eficiente*. Disponible en: <https://www.tudelft.nl>
13. Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). (2023). *Integración de Inteligencia Artificial en Sistemas Multimodales*. Disponible en: <https://www.mit.edu>
14. Universidad de Glasgow. (2023). *Salud Pública y Transporte Público Eléctrico*. Disponible en: <https://www.glasgow.ac.uk>
15. Universidad Politécnica de Milán. (2023). *Reducción de la Contaminación Acústica Mediante Trenes Eléctricos*. Disponible en: <https://www.polimi.it>
16. Oliver Wyman. (2024). *El impacto mundial de la movilidad compartida*. Disponible en: <https://www.oliverwyman.es/es/nuestra-experiencia/insights/2024/mar/impacto-mundial-de-la-movilidad-compartida.html>
17. Celering. (2023). *Movilidad Compartida: Beneficios y Retos de Carpooling y Carsharing*. Disponible en: <https://celering.com/movilidad-compartida-beneficios-y-retos-de-carpooling-y-carsharing/>
18. Chrysler. (2023). *Movilidad compartida: desafíos y beneficios descifrados*. Disponible en: <https://chrysler.fr/es/movilidad-compartida-comprender-los-desafios-y-beneficios/>
19. Motorpress Digital. (2024). *Cómo la movilidad compartida está ayudando a reducir las emisiones de vehículos*. Disponible en: <https://www.motorpressdigital.com/como-la-movilidad-compartida-esta-ayudando-a-reducir-las-emisiones-de-vehiculos/12245>
20. Todo Ingenierías. (2023). *Transporte compartido: soluciones para una movilidad sostenible*. Disponible en: <https://todoingenierias.com/transporte-compartido-soluciones-para-una-movilidad-sostenible/>

Referencias capítulo 5

- [4] US Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries: Lithium*, 2022.
- [5] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2021*.
- [6] Wood Mackenzie, *Energy Storage Outlook 2023*.
- [7] BloombergNEF, *Battery Market Trends 2022*.
- [8] International Energy Agency, *China EV Market Report 2022*.
- [9] Tesla, *Gigafactory Overview*, 2016.
- [10] European Commission, *Green Deal Policies and Energy Storage*, 2020.
- [11] Environmental Science & Technology, *Impacts of Lithium Extraction on Ecosystems*, 2019.
- [12]<https://www.globenewswire.com/news-release/2022/08/18/2500645/0/en/Smart-Grid-Market-Size-Projected-to-Grow-103-4-Billion-by-2026-at-a-CAGR-of-19-1.html>

Peak Metals, Minerals, Energy, Wealth, Food and Population: Urgent Policy Considerations for a Sustainable Society:

<https://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/55190fd49c678.pdf>

Referencias capítulo 6

[1] <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31850-y>

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-01/Battery%20Critical%20Materials%20Workshop%20Report%20-%20FINAL.pdf>

[1] *Journal of Energy Storage* (2021). "Impact of Depth of Discharge on Lithium-Ion Battery Degradation."

[2] Moto1pro, 2024. Ventas de coches en España. Disponible en:

<https://www.moto1pro.com/actualidad/ventas-de-motos-en-espana-2023-positivo-salvo-para-electricas>.

[3] Moto1pro, 2024. Datos de motos y scooters en España. Disponible en:

<https://www.moto1pro.com/actualidad/ventas-de-motos-en-espana-2023-positivo-salvo-para-electricas>.

[4] Movilidad Eléctrica, 2023. Bicicletas eléctricas en Europa. Disponible en:

<https://movilidadelectrica.com/demanda-de-patinetes-electricos>.

[5] Channel Partner, 2023. El año del patinete eléctrico en España. Disponible en:

<https://www.channelpartner.es/movilidad/el-ano-del-patinete-electrico-en-el-canal>.

[6] El País, 2024. Crecimiento del almacenamiento estacionario. Disponible en:

<https://elpais.com/america-futura/2024-12-19/la-caida-de-los-precios-de-las-baterias-impulsa-un-boom-de-almacenamiento-de-energia-limpia>.

Referencias capítulo 8:

[1] visforvoltage.org

[2] <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/1/36#:~:text=repurposing%20batteries%20is%20evaluated%20for,the%20Ostrobothnia%20region%20and%20Finland>

[3] <https://ncst.ucdavis.edu/research-product/transportation-electric-vehicle-lithium-ion-batteries-end-life-literature-review#:~:text=to%20battery%20reuse%20or%20recycling%2C,inclusing%20the%20regulatory%20framework%20and>

Referencias capítulo 9

[1] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519306761>

[2] [mdpi.com](https://www.mdpi.com)

[2] [greenauto.com](https://www.greenauto.com)

ANEXO CÓDIGO DE DEGRADACIÓN DE LAS BATERÍAS

```
import pandas as pd
```

```
import yaml
```

```
import numpy as np
```

```
from IPython.display import clear_output, display
```

```
import time
```

```
import plotly.graph_objects as go
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# Cargar configuración
```

```
with open('config.yaml', 'r') as file:
```

```
config = yaml.safe_load(file)
```

```
# Generación del conjunto inicial de baterías
```

```
# 150 coches
```

```
n_batteries = config.get('n_batteries')
```

```
n_contenedores = config.get('n_contenedores')
```

```
capacidad_inicial_estandar = config.get('capacidad_inicial')
```

```
# Numero de baterias iniciales y maximas
```

```
limites_uso = {
```

```
    "coche": 150,
```

```
    "moto": 900,
```

```
    "bici": 800,
```

```
    "scooter": 800,
```

```
    "herramienta": 1300,
```

```
    "almacenamiento": 600
```

```
}
```

```
n_modulos = {
```

```
    "moto": 10,
```

```
    "bici": 3,
```

```
    "scooter": 3,
```

```
    "herramienta": 2,
```

```
    "almacenamiento": 34
```

```
}
```

```
def init_battery():
```

```
    df = pd.DataFrame({
```

```
        "container_id": [f'C{i}' for i in range(1, n_contenedores + 1) for _ in range(n_batteries)],
```

```
        "battery_id": [f'B{n}' for _ in range(1, n_contenedores + 1) for n in range(1, n_batteries + 1)],
```

```
        "capacity": [capacidad_inicial_estandar] * n_batteries * n_contenedores,
```

```
        "battery_type": ['coche'] * n_batteries * n_contenedores,
```

```
        "n_transitions": [0] * n_batteries * n_contenedores,
```

```
        "health_index": [100] * n_batteries * n_contenedores,
```

```
        "cicle_change": 0, # Iteraciones necesarias para que se desgaste una bateria
```

```
        "moto": 0,
```

```
"scooter":0,  
  
"bici":0,  
  
"herramienta":0,  
  
"almacenamiento":0  
  
})  
  
allowed = pd.DataFrame(columns=df.columns)  
  
return df, allowed  
  
df, allowed = init_battery()  
  
# df.to_excel('datos.xlsx', index=False)  
  
# Emisiones iniciales  
  
mask = df[['almacenamiento']].eq(1).all(axis=1)  
  
df.loc[mask]  
  
co2_por_kwh = 125
```

```
df['co2'] = df['capacity'] * co2_por_kwh
```

```
# Costos
```

```
costo_fabricacion_nueva = 200
```

```
coste_etapa = {
```

```
    "coche": 20,
```

```
    "moto": 15,
```

```
    "scooter": 10,
```

```
    "bici": 5,
```

```
    "herramienta": 3,
```

```
    "almacenamiento": 10
```

```
}
```

```
cambios_desgaste = {
```

```
    "coche": 90,
```

```
    "moto": 80,
```

```
    "scooter": 70,
```

```
    "bici": 70,
```

"herramienta": **60**,

"almacenamiento": **20**

}

dias_ciclo = {

"coche": **8**,

"moto": **2**,

"scooter": **2**,

"bici": **3**,

"herramienta": **1**,

"almacenamiento": **2**

}

errores_ciclo = {

"coche": **5**,

"moto": **1**,

"scooter": **1**,

"bici": **2**,

"herramienta": **1**,

"almacenamiento": **1**

}

capacidad_inicial = {

"coche": capacidad_inicial_estandar,

"moto": capacidad_inicial_estandar * **0.7**,

"scooter": capacidad_inicial_estandar * (**0.7**2**),

"bici": capacidad_inicial_estandar * (**0.7**3**),

"herramienta": capacidad_inicial_estandar * (**0.7**4**),

"almacenamiento": capacidad_inicial_estandar * (**0.7**5**),

"reciclaje": capacidad_inicial_estandar * (**0.7**6**)

}

capacidad_max_por_activo = {

"moto": capacidad_inicial['moto'] * **339**,

"scooter": capacidad_inicial['scooter'] * **150**,

"bici": capacidad_inicial['bici'] * **300**,

"herramienta": capacidad_inicial["herramienta"] * **480**,

"almacenamiento": capacidad_inicial['almacenamiento'] * **510**

}

cambios_estado = {

"coche": "moto",

"moto": "scooter",

"scooter": "bici",

"bici": "herramienta",

"herramienta": "almacenamiento",

"almacenamiento": "almacenamiento"

}

prioridades = ["moto", "bici", "scooter", "herramienta", "almacenamiento"]

dias_sim = config.get('tiempo_simulacion')

pasos_dia = config.get('pasos_por_dia')

pasos_totales = dias_sim * pasos_dia

```
min_desgaste = config.get('min_indice_desgaste_por_ciclo')

max_desgaste = config.get('max_indice_desgaste_por_ciclo')

df['limite_ciclo'] = df['battery_type'].map(dias_ciclo)

random_values = np.random.uniform(min_desgaste, max_desgaste, size=len(df))

df.loc[df['cicle_change'] == 0, 'cicle_change'] = df.loc[df['cicle_change'] == 0].apply(
    lambda row: np.random.randint(
        dias_ciclo[row['battery_type']] * pasos_dia - errores_ciclo[row['battery_type']] + 1,
        dias_ciclo[row['battery_type']] * pasos_dia
    ),
    axis=1
)

pd.set_option('display.max_rows', 100)

# Inicializar valores
```

```
df['health_index'] = 91
```

```
df['capacity'] = 0.091
```

```
# Tablas para valor residual
```

```
valor_residual_moto = pd.DataFrame(columns=['val_res', 'val_res_acum', 'n_baterias'])
```

```
valor_residual_scooter = pd.DataFrame(columns=['val_res', 'val_res_acum', 'n_baterias'])
```

```
valor_residual_bici = pd.DataFrame(columns=['val_res', 'val_res_acum', 'n_baterias'])
```

```
valor_residual_herramienta = pd.DataFrame(columns=['val_res', 'val_res_acum', 'n_baterias'])
```

```
valor_residual_almacenamiento = pd.DataFrame(columns=['val_res', 'val_res_acum',  
'n_baterias'])
```

```
estados_list = ['coche', 'moto', 'scooter', 'bici', 'herramienta', 'almacenamiento']
```

```
# Bucle de simulación
```

```
if 'allowed' not in globals():
```

```
    allowed = pd.DataFrame(columns=df.columns)
```

```
for i in range(pasos_totales):
```

```
    if (df['capacity'] == 0).all():
```

break

```
# CICLO DE DESGASTE
```

```
random_values = np.random.uniform(min_desgaste, max_desgaste, size=len(df))
```

```
valid_mask = (df['battery_type'] != 'reciclar') & (df['cicle_change'] == 0) & (df['capacity'] > 0)
```

```
valid_mask = valid_mask.reindex(df.index, fill_value=False)
```

```
dias_ciclo_values = df['battery_type'].map(dias_ciclo) * pasos_dia
```

```
df.loc[valid_mask, 'capacity'] -= random_values[valid_mask]
```

```
df.loc[df['capacity'] < 0, 'capacity'] = 0
```

```
df.loc[valid_mask, 'limite_ciclo'] += dias_ciclo_values[valid_mask]
```

```
df.loc[valid_mask, 'health_index'] = (
```

```
    df.loc[valid_mask, 'capacity'] /
```

```
    df.loc[valid_mask, 'battery_type'].map(capacidad_inicial)
```

```
) * 100
```

```
# Reasignar nuevos ciclos aleatorios
```

```
df.loc[df['cicle_change'] == 0, 'cicle_change'] = df.loc[df['cicle_change'] == 0].apply(
```

```
lambda row: max(1, np.random.randint(  
  
    dias_ciclo[row['battery_type']] * pasos_dia - (errores_ciclo[row['battery_type']] + 1),  
  
    dias_ciclo[row['battery_type']] * pasos_dia  
  
)),  
  
axis=1  
  
)  
  
# DISPONIBILIZAR BATERÍAS DESGASTADAS  
  
estado_cambio_mask = df.apply(  
  
    lambda row: row['health_index'] <= cambios_desgaste.get(row['battery_type'], 70),  
  
    axis=1  
  
)  
  
desgastadas = df[estado_cambio_mask]  
  
df = df[~estado_cambio_mask]  
  
allowed = pd.concat([allowed, desgastadas], ignore_index=True)  
  
# ASIGNAR BATERÍAS DISPONIBLES A HUECOS  
  
if len(allowed) >= 60:
```

for estado in prioridades:

if df['battery_type'].value_counts().get(estado, 0) >= limites_uso[estado]:

continue

capacidad_actual = df[df[estado] == 1]['capacity'].sum()

capacidad_necesaria = capacidad_max_por_activo[estado] - capacidad_actual

if capacidad_necesaria / capacidad_max_por_activo[estado] < 0.05:

continue

estados_menos_prioritarios = prioridades[prioridades.index(estado) + 1:]

filtro_estados_previos = allowed[estados_menos_prioritarios].sum(axis=1) == 0

baterias_aceptadas = allowed[filtro_estados_previos].sort_values(by="capacity")

capacidad_acumulada = 0

baterias_asignadas_idx = []

for idx, bateria **in** baterias_aceptadas.iterrows():

```
if capacidad_acumulada >= capacidad_necesaria * 0.95:  
  
    break  
  
    if df['battery_type'].value_counts().get(estado, 0) + len(baterias_asignadas_idx) >=  
    limites_uso[estado]:  
  
        break  
  
        baterias_asignadas_idx.append(idx)  
  
        capacidad_acumulada += bateria["capacity"]  
  
if baterias_asignadas_idx:  
  
    baterias_asignadas_df = allowed.loc[baterias_asignadas_idx].copy()  
  
    # Cálculo de costes  
  
    n_mod = n_modulos[estado]  
  
    baterias_asignadas_df['coste_asignacion'] = (  
  
        (baterias_asignadas_df['capacity'] - 0.7).abs()  
  
        .div(0.3)  
  
        .mul(160)  
  
        .mul(0.4)
```

```
.mul(n_mod)

)

total_coste = baterias_asignadas_df['coste_asignacion'].sum()

n_baterias = len(baterias_asignadas_idx)

df_name = f"valor_residual_{estado}"

df_residual = eval(df_name)

acum_prev = df_residual['val_res_acum'].iloc[-1] if not df_residual.empty else 0

nueva_fila = {

    'val_res': total_coste,

    'val_res_acum': acum_prev + total_coste,

    'n_baterias': n_baterias

}

df_residual = pd.concat([df_residual, pd.DataFrame([nueva_fila])],
ignore_index=True)

globals()[df_name] = df_residual

baterias_asignadas_df['cicle_change'] = 0
```

```
baterias_asignadas_df['battery_type'] = estado

baterias_asignadas_df['cap_init'] = baterias_asignadas_df['capacity']

df = pd.concat([df, baterias_asignadas_df], ignore_index=True)

allowed = allowed.drop(baterias_asignadas_idx, errors='ignore')

df.loc[df['cicle_change'] > 0, 'cicle_change'] -= 1

# Mostrar resultados

clear_output(wait=True)

print(f'Iteración {i + 1}/{pasos_totales}')

print("Estado del DataFra
```

