

De la diagnosi a la segona vida: intel·ligència artificial i big data en bateries de vehicles elèctrics

Diagnosi avançada, reutilització segura i
economia circular basada en dades



CIDAI-POC-2025-02

Some rights reserved. This work is available under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International ([CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)).

Segons els termes d'aquesta llicència, podeu copiar, redistribuir i adaptar l'obra amb fins no comercials, sempre que l'obra sigui citada adequadament, tal com s'indica a continuació.

En qualsevol ús d'aquest treball, no s'ha de suggerir que el CIDAI doni suport a cap organització, producte o servei específic. No es permet l'ús del logotip CIDAI.

Si adapteu l'obra, heu de llicenciar-la amb la mateixa llicència Creative Commons o equivalent.

Si creeu una traducció d'aquest treball, heu d'afegir la següent exempció de responsabilitat juntament amb la cita suggerida: "Aquesta traducció no la va crear el Centre of Innovation for Data tech and Artificial Intelligence (CIDAI). CIDAI no es fa responsable del contingut ni de l'exactitud d'aquesta traducció. L'edició original en català serà l'edició autèntica i vinculant".

Qualsevol mediació relacionada amb disputes derivades de la llicència es durà a terme d'acord amb les normes de mediació de la [World Intellectual Property Organization](https://www.wipo.int/mediation/).

Cita suggerida. CIDAI-POC-2025-02 // De la diagnosi a la segona vida: intel·ligència artificial i big data en bateries de vehicles elèctrics per Dra. Martha Ivon Cardenas, IDEAI-UPC, CIDAI, 2026. Llicència: [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



1.	ABSTRACT	4
2.	DESCRIPCIÓ DEL PROBLEMA QUE RESOL	7
3.	IMPLEMENTACIÓ DE LA SOLUCIÓ	10
4.	POTENCIAL IMPACTE DE LA SOLUCIÓ	13
5.	TREBALLS CITATS	14



1. Abstract

La transició cap a la mobilitat elèctrica ha incrementat de manera exponencial l'ús de bateries d'ió liti, convertint la seva gestió al final de la primera vida útil en un repte tecnològic, econòmic i ambiental de primer ordre. Les projeccions del sector indiquen que, a Europa, a partir de l'any 2035 es gestionaran anualment més d'1,2 milions de tones de bateries, fet que posa de manifest la necessitat urgent de solucions escalables i sostenibles per al seu tractament ¹. En l'actualitat, l'absència de sistemes de diagnosi fiables i estandarditzats condueix a la retirada prematura de bateries amb valor residual significatiu, provocant la pèrdua de materials crítics i un impacte ambiental evitable.

Aquesta prova de concepte presenta la solució Intelligent Battery Analytics (IBA), una plataforma tecnològica que integra models físics, intel·ligència artificial i tècniques avançades d'anàlisi de big data per a la diagnosi, classificació i revalorització de bateries de vehicles elèctrics. La plataforma permet identificar amb elevada fiabilitat quines bateries són aptes per a una segona vida en aplicacions d'emmagatzematge estacionari i quines han de ser derivades a processos de reciclatge, assolint una precisió superior al 96%.

La implantació d'aquesta solució optimitza la gestió del final de vida útil de les bateries i transforma un flux de residus en un recurs estratègic, alineant-se plenament amb els principis de l'economia circular i amb els requisits del nou Reglament de Bateries de la Unió Europea ². Els beneficis principals inclouen la reducció significativa dels costos de gestió, l'allargament del cicle de vida dels materials i el reforç d'una cadena de valor més resilient i sostenible.

¹ European Commission. *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU*. 2023.

² European Parliament and Council. *Regulation (EU) 2023/1542 concerning batteries and waste batteries*. Official Journal of the European Union, 2023.

1.1. Objectius

L'objectiu d'aquest document és presentar i contextualitzar la solució Intelligent Battery Analytics (IBA) com una eina avançada per a la diagnosi, classificació i revalorització de bateries d'ió liti retirades de vehicles elèctrics. La prova de concepte té com a finalitat exposar els principis tecnològics que sustenten la solució, evidenciar-ne els resultats clau en termes de fiabilitat i valor afegit, i analitzar el seu potencial impacte ambiental, econòmic i industrial. Addicionalment, el document situa la proposta en el marc de la regulació europea vigent i de les estratègies d'economia circular, amb l'objectiu de facilitar la presa de decisions per part d'agents industrials, institucionals i reguladors.

1.2. Visió

La visió d'Intelligent Battery Analytics és esdevenir un estàndard tecnològic de referència per a la gestió intel·ligent i integral del cicle de vida de les bateries d'ió liti. Aquesta visió se sustenta en l'assoliment d'una diagnosi objectiva, automatitzada i escalable que permeti maximitzar la recuperació de valor de les bateries, garantir la seguretat operativa i minimitzar la petjada ambiental associada. Aquest enfocament és coherent amb els principis d'economia circular aplicats a la cadena de valor de les bateries i amb la necessitat de reduir la dependència europea de l'extracció de matèries primeres crítiques, tal com assenyalen diversos informes recents de la Unió Europea.

1.3. Resum del problema

El problema central rau en la manca de metodologies fiables, ràpides i estandarditzades per avaluar l'estat real de les bateries d'ió liti al final de la seva vida útil en vehicles elèctrics. Diversos estudis indiquen que una proporció significativa de les bateries retirades conserven entre el 70% i el 80% de la seva capacitat original, fet que les fa potencialment aptes per a aplicacions de segona vida menys exigents, com l'emmagatzematge estacionari³. Malgrat això, aquestes bateries sovint es descarten prematurament.

Aquesta situació comporta una ineficiència econòmica notable, ja que els processos manuals de testatge són lents, costosos i intensius en recursos especialitzats. Alhora, genera un impacte ambiental rellevant, incrementant el volum de residus electrònics complexos i desaprofitant l'oportunitat d'evitar les emissions de CO₂ associades a la fabricació de bateries noves⁴. Finalment, la manca de diagnosi precisa pot introduir riscos de seguretat en fases posteriors de reutilització o reciclatge, especialment en un context de gran heterogeneïtat tecnològica.

3 Martínez-Laserna, E., et al. (2022). *Second-life batteries: A review on degradation mechanisms, testing methods, and performance evaluation*. Journal of Energy Storage, 55, 105385.

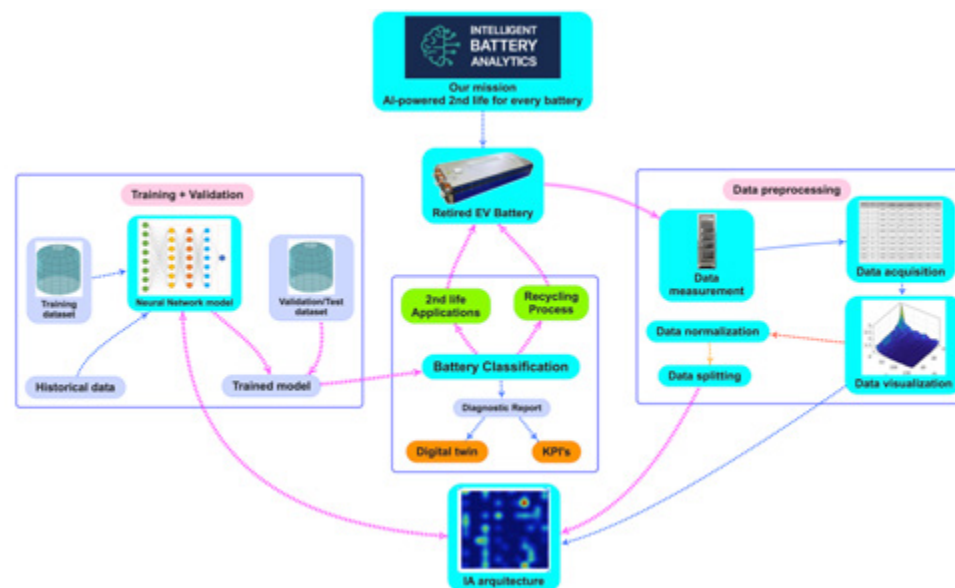
4 Peters, J. F., & Weil, M. (2021). *A circular economy approach for lithium-ion batteries: Repurposing and recycling in the European Union*. Resources, Conservation and Recycling, 174, 105773.

1.4. Solució

La solució proposada es basa en la combinació de models físics i tècniques avançades d'intel·ligència artificial per analitzar dades reals de funcionament de les bateries. El sistema permet identificar anomalies crítiques, classificar les bateries segons la seva idoneïtat per a aplicacions de segona vida o reciclatge, predir la degradació futura i generar informes i certificats digitals amb un elevat nivell de fiabilitat ⁵.

La Figura 1 il·lustra el canvi de paradigma que introdueix la diagnosi avançada en la gestió del final de vida de les bateries. Mentre que els processos actuals tendeixen a una decisió binària basada en criteris genèrics, la solució proposada habilita una presa de decisions basada en dades objectives, permetent maximitzar el valor residual de cada bateria i reduir els riscos operatius i ambientals associats a una gestió inadequada. Aquest enfocament és coherent amb les recomanacions europees en matèria de traçabilitat, sostenibilitat i economia circular.

Figura 1 – Comparativa conceptual entre el flux actual de gestió de bateries de vehicles elèctrics al final de la primera vida útil i el flux optimitzat mitjançant una diagnosi avançada basada en intel·ligència artificial. L'enfocament proposat permet substituir la retirada massiva o el reciclatge prematur per una classificació informada orientada a la reutilització, la recondicionament i el reciclatge eficient.



⁵ Liu, K., Li, Y., Hu, X., et al. (2020). A review of modeling, acquisition, and application of lithium-ion battery impedance for onboard battery management. eTransportation, 6, 100093.

2. Descripció del problema que resol

La transició cap a un model energètic basat en fonts renovables i mobilitat elèctrica ha incrementat de manera exponencial l'ús de bateries d'ió liti, convertint-les en un recurs estratègic però limitat. Malgrat això, la gestió del final de la primera vida útil presenta mancances rellevants, principalment derivades de la manca de sistemes de diagnosi objectius i automatitzats.

2.1. Context de la segona vida de les bateries

La reutilització de bateries de vehicles elèctrics en aplicacions de segona vida s'ha consolidat com un element clau dins del debat sobre sostenibilitat i economia circular. A mesura que la penetració del vehicle elèctric i dels sistemes d'energia renovable augmenta, també ho fa el volum de bateries que arriben al final de la seva primera vida útil. Tot i que aquestes bateries deixen de complir els requisits exigents de l'ús en automoció, habitualment quan la seva capacitat cau per sota del 80%, sovint conserven un potencial energètic suficient per a aplicacions menys demandants.

Aquest fet situa les bateries de segona vida com una oportunitat estratègica per allargar el cicle de vida dels sistemes d'emmagatzematge energètic, reduir la generació de residus i disminuir la dependència de noves matèries primeres crítiques. La reutilització permet diferir els processos de reciclatge, que són complexos i intensius en energia, i contribueix a reduir la petjada ambiental associada tant a la fabricació com a la gestió del final de vida de les bateries.

2.2. Retirada prematura i manca de diagnosi fiable

La determinació de la “fi de la vida útil” en un vehicle es basa sovint en criteris genèrics (com ara l'autonomia reduïda) o en proves electroquímiques invasives, lentes i costoses. No existeix un protocol àmpliament acceptat per avaluar de manera ràpida i no destructiva l'estat real de salut (SOH) i la seguretat interna d'una bateria retirada. Com a conseqüència, un percentatge significatiu de bateries que encara conserven entre el 70% i el 80% de la seva capacitat original es retiren prematurament¹.

Aquest fet representa una pèrdua econòmica directa per a propietaris i gestors de flotes, i desperdicia un recurs valuós que podria oferir serveis en aplicacions estacionàries durant anys addicionals.

¹ Martínez-Laserna, E., et al. (2018). *Evaluation of lithium-ion battery second life performance, degradation and economic feasibility in Europe*. Journal of Energy Storage, 18, 185-195.



2.3. Impacte econòmic, ambiental i operatiu

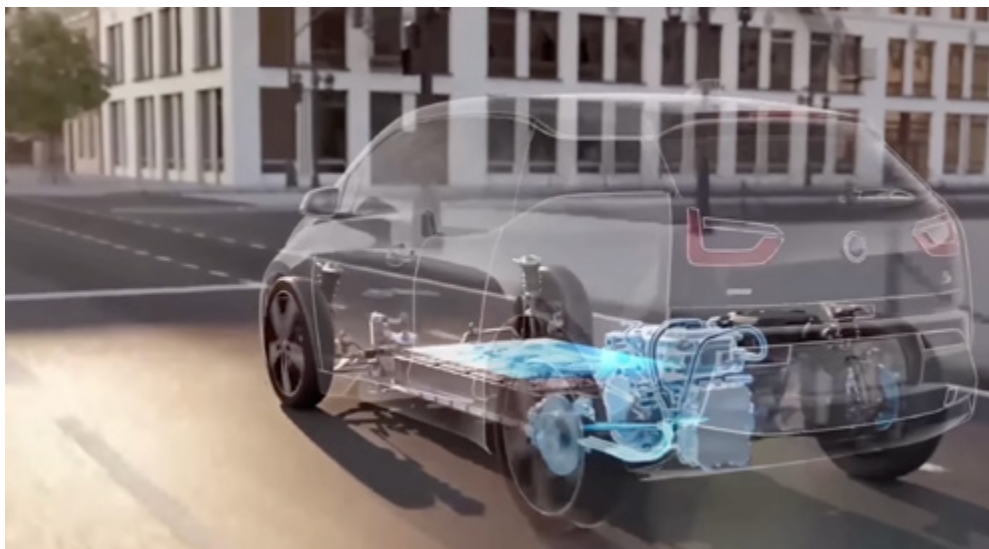
Els mètodes actuals de gestió presenten un impacte multifacètic:

- **Econòmic:** El reciclatge de bateries és un procés complex i costós. Enviar a reciclar unitats que podrien tenir una segona vida no és òptim des del punt de vista del retorn de la inversió. D'altra banda, la incertesa sobre l'estat de les bateries inhibeix el desenvolupament d'un mercat secundari robust i transparent.
- **Ambiental:** La fabricació d'una nova bateria d'ió liti té una petjada de carboni i un consum d'aigua i recursos minerals significatius. La reutilització directa evita aquests impactes inicials. La retirada prematura incrementa innecessàriament el volum de residus, que, si no es gestionen correctament, poden suposar riscos de contaminació².
- **Operatiu:** Els centres de recollida i gestors de residus es troben amb un flux heterogeni de productes sense informació clara sobre el seu estat. Això dificulta la logística, l'emmagatzematge segur i la tria per al destí més adequat, introduint ineficiències i riscos potencials a la cadena de valor.

² Huang, Y., Duan, Q., & Tang, X. (2023). Digital twin for lithium-ion batteries: From model development to applications in second-life prediction. *Journal of Power Sources*, 580, 233413.

2.4. Enfocs computacionals actuals en la gestió de bateries de vehicles elèctrics

En els darrers anys, la recerca i la innovació industrial han avançat de manera significativa en l'ús d'enfocs computacionals per millorar la gestió de les bateries de vehicles elèctrics. Aquests enfocaments s'han centrat principalment en l'estimació de paràmetres clau com l'estat de càrrega, l'estat de salut i la predicció de la degradació a partir de dades operatives reals, combinant models físics simplificats amb tècniques avançades d'anàlisi de dades i aprenentatge automàtic³.



3 Poliak, M., et al. *Computational and data-driven approaches for electric vehicle battery management: A comprehensive review*. Applied Sciences, 2024.

Paral·lelament, l'ús d'intel·ligència artificial ha esdevingut un element central en la detecció d'anomalies i la predicció del comportament futur de les bateries, especialment mitjançant models híbrids que integren coneixement físic amb enfocaments data-driven. Aquestes aproximacions ofereixen un equilibri adequat entre precisió, interpretabilitat i escalabilitat, aspectes clau per a la seva adopció en entorns industrials reals⁴.

Tot i aquests avenços, la major part dels enfocaments descrits a la literatura continuen estant principalment orientats a l'operació de les bateries durant la seva primera vida útil en el vehicle. Quan s'apliquen a escenaris de segona vida, aquests mètodes presenten limitacions associades a la manca d'històrics complets, la variabilitat entre unitats i els requisits addicionals de seguretat i certificació. Aquest context posa de manifest la necessitat de solucions específicament dissenyades per donar suport a la classificació i revalorització de bateries retirades, facilitant una presa de decisions fiable i escalable en el marc de l'economia circular⁵.

4 Zhang, C., et al. *Physics-informed machine learning for lithium-ion battery health monitoring and lifetime prediction*. Energy AI, 2022.

5 Ahmadi, L., et al. *Second-life lithium-ion batteries: Challenges, opportunities and recent advances*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021.

3. Implementació de la solució

3.1. Arquitectura, tecnologia i dades utilitzades

La solució es fonamenta en una arquitectura modular que integra un pipeline de dades, un motor d'intel·ligència artificial i un sistema de classificació i generació d'informes. El procés inclou l'adquisició de dades, la normalització i el pre-processament, així com l'entrenament de models híbrids. S'empren tècniques de detecció d'anomalies, models estadístics multivariables, xarxes neuronals i un residual físic basat en un model òhmic simplificat.



El flux de treball es compon de les següents etapes:

1. Ingestió de Dades: El sistema s'alimenta de dades procedents de múltiples fonts: registres del BMS (Battery Management System) del vehicle, proves de banc en laboratori, inspeccions visuals digitals i metadades del fabricant.

2. Preprocessament i Normalització: S'apliquen tècniques de neteja, filtrat i normalització per homogeneïtzar les dades provinents de diferents tecnologies (NMC, LFP, etc.) i patrons d'ús.

3. Nucli Analític (Models Híbrids):

- **Model Físic:** S'utilitza un model de circuit equivalent parametrizable [6] per calcular propietats internes bàsiques (resistència interna, capacitat) a partir de corbes de càrrega/descàrrega.
- **Models d'IA:** S'implementen xarxes neuronals i models d'aprenentatge automàtic per a tasques específiques:
 - **Detecció d'Anomalies:** Per identificar cèl·lules o mòduls amb comportament aberrant.
 - **Regressió per a l'SOH:** Per estimar la capacitat residual amb alta precisió.
 - **Classificació Multicategoria:** Per assignar la bateria a una ruta òptima de valorització.
- **Integració Híbrida:** Els paràmetres extrets pel model físic serveixen com a features d'entrada als models d'IA, millorant la interpretabilitat i el rendiment amb pocs dades.

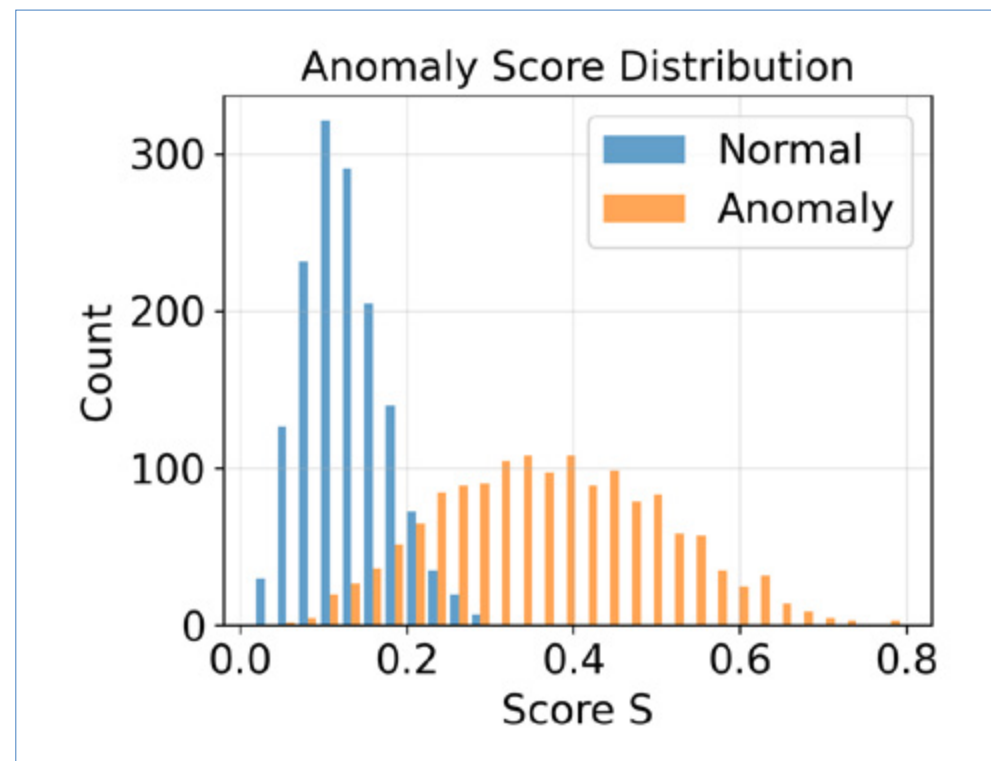
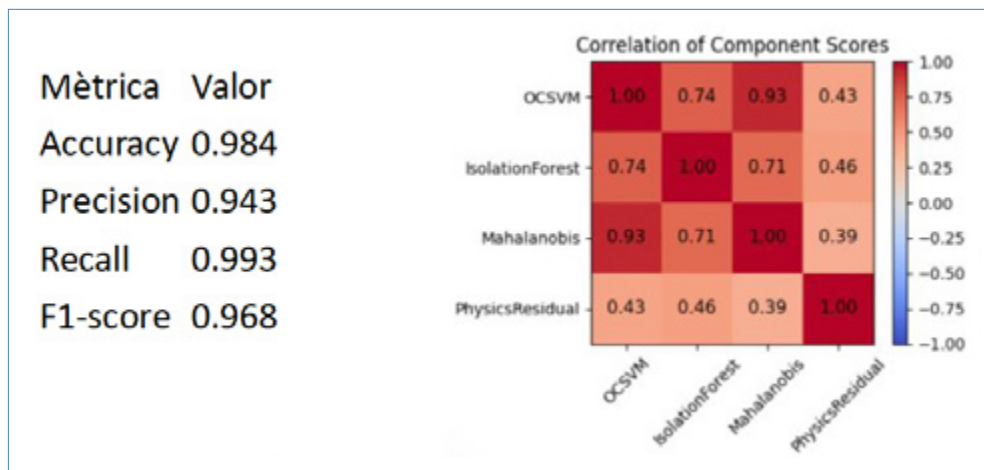
4. Postprocessament i Decisions: El sistema genera una puntuació global de salut, una recomanació de destí (2a Vida, Recondicionament, Reciclatge) i una predicció de vida útil residual.

5. Interfície i Exportació: Els resultats es presenten en un dashboard interactiu i s'exporten en informes estructurats i certificats digitals.

3.2. Reptes resolts i resultats obtinguts

La implementació de la solució permet la detecció d'anomalies crítiques amb elevada sensibilitat, la classificació fiable de bateries i la predicció de la seva degradació futura mitjançant un digital twin. La validació del sistema, realitzada amb més de 1.500 mostres reals, mostra una precisió superior al 96% i un valor de recall del 99,3%, fet que garanteix una elevada fiabilitat en entorns industrials.

Figura 2 – Resultats de la validació del sistema Intelligent Battery Analytics sobre un conjunt de bateries reals. La figura mostra la capacitat de classificació del sistema i la correlació entre l'estat de salut estimat i els valors de referència obtinguts en entorn controlat, evidenciant una elevada fiabilitat per a aplicacions industrials.





3.3. Limitacions actuals de la tecnologia

Tot i els resultats prometedors, el sistema presenta limitacions que guien el desenvolupament futur:

- **Dependència de la qualitat de les dades d'entrada:** Els resultats són tan bons com les dades disponibles. Els registres incomplets o erronis del BMS poden degradar el rendiment. Es requereixen protocols millorats de recollida de dades.
- **Necessitat d'adaptació contínua:** L'aparició de noves químiques de bateria (ex.: sòlides) i nous patrons d'ús (ex.: càrrega ultrarràpida) requereixen la reentrenament o l'adaptació dels models.
- **Generalització entre fabricants:** Tot i que el sistema està dissenyat per ser genèric, pot requerir una fase de calibratge inicial quan s'aborda un nou tipus de bateria d'un fabricant específic per primera vegada.
- **Integració amb la cadena logística física:** La solució ofereix una avaluació digital. La seva utilitat màxima es realitza quan s'integra amb sistemes automatitzats de manipulació, tria i remanufactura física.

4. Potencial impacte de la solució

L'allargament de la vida útil de les bateries mitjançant la seva reutilització contribueix de manera significativa a la reducció de l'impacte ambiental del sector. Diversos estudis de cicle de vida estimen que la reutilització d'una bateria de vehicle elèctric pot evitar fins a 150 kg de CO₂ equivalent en comparació amb la fabricació d'una unitat nova¹. A més, aquest enfocament redueix la pressió sobre l'extracció de matèries primeres crítiques i reforça la seguretat de la cadena de subministrament europea.

Les aplicacions més rellevants de les bateries de segona vida se centren en l'emmagatzematge estacionari d'energia, tant en entorns residencials i comercials com a nivell de xarxa. En aquests contextos, les bateries poden facilitar la integració de fonts renovables intermitents, donar suport a la gestió de la demanda, oferir serveis de suport a la xarxa i proporcionar sistemes de backup energètic per a infraestructures crítiques. Aquestes aplicacions contribueixen tant a la viabilitat econòmica de projectes renovables com a la resiliència del sistema energètic.

Malgrat aquest potencial, la reutilització de bateries presenta reptes tècnics i operatius significatius. La variabilitat en l'estat de salut, l'heterogeneïtat tecnològica entre fabricants i els requisits de seguretat fan imprescindible disposar de mecanismes de diagnosi fiables i escalables. En aquest sentit, la capacitat d'avaluar de manera objectiva l'estat real de cada bateria esdevé un factor crític per garantir una reutilització segura, eficient i alineada amb els principis de l'economia circular.

¹ Baum, Z., Chen, X., & Dunn, J. B. (2023). *Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles*. *Environmental Science & Technology*, 57(12), 4816–4827.



5. Treballs citats

- [1] International Energy Agency (IEA). *Global EV Outlook 2023*.
- [2] Harper, G. et al. (2019). *Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles*. Nature.
- [3] Casals, L. C., García, B. A., & Canal, C. (2019). *Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis*. Journal of Cleaner Production.
- [4] Neubauer, J., & Pesaran, A. (2011). *Techno-economic analysis of PHEV battery second use*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [5] Martinez-Laserna, E. et al. (2018). *Battery second life: Hype, hope or reality?*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [6] Severson, K. A. et al. (2019). *Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation*. Nature Energy.
- [7] Richardson, R. R., Osborne, M. A., & Howey, D. A. (2017). *Gaussian process regression for forecasting battery state of health*. IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [8] Richardson, R. R., Osborne, M. A., & Howey, D. A. (2017). *Gaussian process regression for forecasting battery state of health and capacity*.
- [9] Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). *Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear PDEs*. Journal of Computational Physics.
- [10] Wang, F., Zhai, Z., Zhao, Z., Di, Y., & Chen, X. (2024). *Physics-informed neural network for lithium-ion battery degradation stable modeling and prognosis*. Nature Communications, 15(1), 4332.
- [11] Lin, C., et al. (2025). *Physics-informed machine learning for accurate SOH estimation of lithium batteries under varied operating conditions*.
- [12] Wang, H.; Tian, J.; Zhou, L.; Liu, X.; Hu, P. *Estimation of SoH and internal resistances of Lithium ion battery based on LSTM network*. J. Energy Storage 2023.

Socis



Membres

