



BATERÍA-COMO-SERVICIO (BAAS) VS. BATERÍA-COMO-PRODUCTO (BAAP): ECONOMÍA
DE BIENES DURADEROS Y EFECTOS SOBRE LA OFERTA DE BATERÍAS DE SEGUNDA
VIDA

Battery-as-a-Service (BaaS) vs. Battery-as-a-Product (BaaP): The Economics of Durable Goods
and the Effects on Second-Life Battery Supply

PABLO ANDRÉS GALLEGO MOLINA

Trabajo de Grado

Asesor

JUAN CAMILO CHAPARRO CARDONA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE FINANZAS, ECONOMÍA Y GOBIERNO
MAESTRÍA EN ECONOMÍA APLICADA
MEDELLÍN
2026

CONTENIDO

SIGLAS.....	7
INTRODUCCIÓN.....	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	12
MARCO TEÓRICO.....	14
ESTRUCTURA DE ANÁLISIS.....	21
MÓDULO A: TCO DEL CONSUMIDOR (BaaS vs BaaP).....	21
MÓDULO B: STOCK – FLUJO SLB.....	37
MÓDULO C: LCOS-SLB Y ESTRUCTURA – COSTO - DESEMPEÑO (ECD).....	44
MÓDULO D: JUEGO ESTRATÉGICO (F, G, U).....	56
CONCLUSIONES.....	69
REFERENCIAS.....	71
ANEXOS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Ppack (BaaP) vs Fee (BaaS)	30
Ilustración 2. Túnel de Viabilidad para el Valor Presente del Fee (BaaS).....	34
Ilustración 3. Stock y Ventas de EV 2010 – 2024.....	42
Ilustración 4. Retiros de EV y Potencial SLB 2010 – 2024	43
Ilustración 5. Simulación LCOS vs LCOS-SLB.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables utilizadas en el estudio	27
Tabla 2. Reemplazos de baterías de vehículos eléctricos (EV) debido a fallas, años modelo (MY) 2011–2023	28
Tabla 3. Cálculo del VP_Fee 2011–2024	29
Tabla 4. Sensibilidad de las variables sobre VP del Fee (BaaS)	32
Tabla 5. Precio del Pack de baterías por kWh.....	33
Tabla 6. Ventas de EV y BEV vs Stock, 2010–2024	40
Tabla 7. Cálculo de SLB Potencia usando Weibull 2010 - 2023	42
Tabla 8. Parámetros y escenarios para cálculo de LCOS y LCOS-SLB	49
Tabla 9. Cuadro Comparativo entre BaaS y BaaP	53
Tabla 10. Escenario de Pagos sin intervención del Gobierno.....	62
Tabla 11. Matriz de Pagos sin intervención del Gobierno.....	62
Tabla 12. Escenario de Pagos con intervención del Gobierno	64
Tabla 13. Matriz de Pagos con intervención del Gobierno	65
Tabla 14. Propuestas de instrumentos de política pública.....	67

RESUMEN

Este trabajo de grado examina los efectos económicos y estratégicos de los modelos Battery-as-a-Product (BaaP) y Battery-as-a-Service (BaaS) sobre la disponibilidad y competitividad de las baterías de segunda vida (Second-Life Batteries, SLB) para almacenamiento estacionario. El estudio se fundamenta en la literatura de bienes duraderos y en la lógica de interacción estratégica bajo equilibrio de Nash, reconociendo que la forma contractual de acceso a la batería modifica la asignación de riesgos, el valor residual y la trazabilidad del activo (Bulow, 1982; Waldman, 2003; Gibbons, 1992).

El análisis de la tesis está organizado en cuatro módulos. El primero compara el costo total de propiedad (TCO) para el usuario bajo los esquemas batería como producto y batería como servicio, mostrando que la reducción del precio del pack nuevo tiende a aumentar el atractivo relativo de la compra. El segundo estima el flujo potencial de baterías de segunda vida mediante un enfoque stock-flujo basado en la difusión de vehículos eléctricos y la distribución de retiros. El tercero contrasta el costo nivelado de almacenamiento (LCOS) entre baterías nuevas y baterías reutilizadas, evidenciando que un menor CAPEX inicial no garantiza menor costo nivelado cuando existen costos de reacondicionamiento, reemplazos y menor energía útil entregada (Schmidt et al., 2019; Steckel et al., 2021). El cuarto representa la interacción estratégica entre fabricante, usuario y gobierno, mostrando que, sin intervención pública, el equilibrio favorece BaaP, mientras que políticas de trazabilidad, estándares y responsabilidad extendida pueden desplazar el equilibrio hacia BaaS/SLB (European Commission, 2023; Harper et al., 2019).

El trabajo concluye que la competitividad de SLB depende tanto de factores tecnológicos y de costos como de condiciones institucionales que faciliten coordinación y recuperación eficiente del activo.

Palabras clave: SLB, BaaS, BaaP, TCO, LCOS, economía de bienes duraderos, teoría de juegos, economía circular.

ABSTRACT

This master's thesis examines the economic and strategic effects of Battery-as-a-Product (BaaP) and Battery-as-a-Service (BaaS) business models on the availability and competitiveness of second-life batteries (SLB) for stationary energy storage. The study draws on the durable goods literature and the logic of strategic interaction under Nash equilibrium, recognizing that contractual access to the battery changes risk allocation, residual value, and asset traceability (Bulow, 1982; Waldman, 2003; Gibbons, 1992).

The thesis analysis is organized into four modules. The first compares the total cost of ownership (TCO) for the user under the battery-as-a-product and battery-as-a-service schemes, showing that a reduction in the price of a new pack tends to increase the relative attractiveness of purchasing. The second estimates the potential flow of second-life batteries using a stock–flow approach based on the diffusion of electric vehicles and the distribution of retirements. The third contrasts the levelized cost of storage (LCOS) between new batteries and repurposed batteries, showing that a lower initial CAPEX does not necessarily guarantee a lower levelized cost when refurbishment costs, replacements, and lower usable energy delivered are present (Schmidt et al., 2019; Steckel et al., 2021). The fourth represents the strategic interaction between the manufacturer, the user, and the government, showing that, without public intervention, the equilibrium favors BaaP, while traceability policies, standards, and extended producer responsibility can shift the equilibrium toward BaaS/SLB (European Commission, 2023; Harper et al., 2019).

The thesis concludes that SLB competitiveness depends not only on technology and cost drivers but also on institutional conditions that facilitate coordination and efficient asset recovery.

Keywords: *SLB, BaaS, BaaP, TCO, LCOS, durable goods economics, game theory, circular economy.*

SIGLAS

A lo largo de este trabajo se usan las siguientes siglas:

Sigla / Símbolo	Significado
BaaP	<i>Battery-as-a-Product</i> — Batería como Producto.
BaaS	<i>Battery-as-a-Service</i> — Batería como Servicio.
BMS	<i>Battery Management System</i> — Sistema de Gestión de Batería.
BNEF	<i>BloombergNEF</i> — Bloomberg New Energy Finance (fuente/analítica del sector).
BOS	<i>Balance of System</i> — Balance del sistema (componentes auxiliares fuera de la batería).
BYD	<i>Build Your Dreams</i> — fabricante/empresa del sector (marca).
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i> — Gastos de capital / inversión.
CATL	<i>Contemporary Amperex Technology Co., Limited</i> — fabricante (empresa del sector).
CO ₂	Dióxido de carbono.
DoD	<i>Depth of Discharge</i> — Profundidad de descarga.
DSCR	<i>Debt Service Coverage Ratio</i> — Índice de cobertura del servicio de deuda.
ECD	Estructura – Costo – Desempeño.
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i> — Ambiental, Social y Gobernanza.
ESMS	<i>Environmental and Social Management System</i> — Sistema de Gestión Ambiental y Social.
EU	<i>European Union</i> — Unión Europea.
EV	<i>Electric Vehicle</i> — Vehículo eléctrico.
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable.
GWP	<i>Global Warming Potential</i> — Potencial de calentamiento global.
HHI	<i>Herfindahl–Hirschman Index</i> — Índice Herfindahl–Hirschman (concentración de mercado).
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> — Comisión Electrotécnica Internacional.
IEA	<i>International Energy Agency</i> — Agencia Internacional de Energía.
IFC	<i>International Finance Corporation</i> — Corporación Financiera Internacional.
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> — Agencia Internacional de Energías Renovables.
IRR	<i>Internal Rate of Return</i> — Tasa Interna de Retorno.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> — Organización Internacional de Normalización.
kW	Kilovatio (unidad de potencia).
kWh	Kilovatio-hora (unidad de energía).
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> — Indicador clave de desempeño.
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> — Análisis de ciclo de vida.
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i> — Costo nivelado de energía.
LCOS	<i>Levelized Cost of Storage</i> — Costo Nivelado del Almacenamiento.
LCOS-SLB	<i>Levelized Cost of Storage – Second-Life Batteries</i> — Costo Nivelado del Almacenamiento con baterías de segunda vida.
LFP	<i>Lithium Iron Phosphate</i> — Fosfato de hierro y litio (química de batería).
MWh	Megavatio-hora (unidad de energía).
NCA	<i>Nickel Cobalt Aluminum (oxide)</i> — Níquel–cobalto–aluminio (química).
NMC	<i>Nickel Manganese Cobalt (oxide)</i> — Níquel–manganeso–cobalto (química).
NPV	<i>Net Present Value</i> — Valor Presente Neto.

ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
O&M	<i>Operation and Maintenance</i> — Operación y mantenimiento.
OPEX	<i>Operational Expenditures</i> — Gastos operativos.
r	Tasa de descuento (en expresiones de valor presente/LCOS).
SCP	<i>Structure–Conduct–Performance</i> — Estructura – Conducta – Desempeño.
Sf	Estrategia del Fabricante.
Sg	Estrategia del Gobierno.
SLB	<i>Second-Life Batteries</i> — Baterías de segunda vida.
SoH	<i>State of Health</i> — Estado de salud de la batería.
Su	Estrategia del Usuario.
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i> — Costo Total de Propiedad.
UL 1974	Norma de <i>Underwriters Laboratories</i> asociada a reutilización/repurposing.
UN 38.3	Norma ONU para transporte de baterías.
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i> — Costo Promedio Ponderado de Capital.

INTRODUCCIÓN

En la última década, los vehículos eléctricos (Electric Vehicles, EV) han pasado de ser una tecnología de nicho a convertirse en uno de los ejes de la transición energética. A diferencia de los vehículos convencionales, cuyo desempeño depende principalmente del motor y el combustible, en los EV el componente central es el paquete de baterías de ion-litio, que almacena la energía y determina autonomía, vida útil y una parte significativa del costo del vehículo. Con el tiempo, estas baterías se degradan y, aunque dejan de ser óptimas para uso automotriz cuando su capacidad cae por debajo de ciertos umbrales técnicos, aún pueden conservar suficiente desempeño para aplicaciones menos exigentes, como el almacenamiento estacionario. Este proceso de reutilización se conoce como baterías de segunda vida (Second-Life Batteries, SLB) y representa una oportunidad económica y ambiental para extender el valor del activo, reducir residuos y mejorar la eficiencia de la cadena de suministro del almacenamiento energético.

La transición energética global está redefiniendo la forma en que se producen, almacenan y consumen los recursos energéticos, impulsando la necesidad de modelos de negocio más sostenibles y flexibles. En este contexto, las baterías de ion-litio se han consolidado como el eje central del almacenamiento eléctrico y la electromovilidad, pero su creciente volumen de producción plantea desafíos significativos en materia de degradación, gestión del fin de vida útil y sostenibilidad del suministro de materiales críticos (BNEF, 2024). Frente a ello, la reutilización de baterías retiradas de vehículos eléctricos (SLB), surge como una alternativa clave dentro de la economía circular, al permitir extender su vida útil en aplicaciones estacionarias y reducir la presión sobre los procesos de reciclaje primario (Harper et al., 2019; Martínez-Laserna et al., 2018).

Bobba et al., sostienen que “Aunque la reutilización de baterías de vehículos eléctricos sigue siendo un mercado poco desarrollado, las aplicaciones de segundo uso de las baterías de vehículos eléctricos están en línea con los principios de economía circular y la jerarquía de gestión de residuos. Aunque se esperan beneficios ambientales sustanciales al reutilizar baterías de tracción, se requieren más esfuerzos en la recogida de datos, modelado de las etapas del ciclo de vida y cálculo de indicadores de impacto para proponer un método armonizado y adaptado de evaluación del ciclo de vida (LCA)” (pág. 214, 2018)

En este trabajo se comparan dos esquemas contractuales alternativos para acceder a la batería. En el modelo batería como producto (Battery-as-a-Product, BaaP), el consumidor adquiere el vehículo con la batería incluida y, por tanto, asume la propiedad del activo, su depreciación y el riesgo de fallas u obsolescencia. En contraste, en el modelo batería como servicio (Battery-as-a-Service, BaaS), el usuario paga una tarifa periódica por el uso de la batería mientras la propiedad y la gestión del ciclo de vida permanecen en manos del proveedor, quien asume la responsabilidad por mantenimiento, garantías y recuperación del activo al final de su primera vida. Esta diferencia en derechos de propiedad altera la asignación de riesgos, el valor residual y los incentivos de trazabilidad, elementos determinantes para el desarrollo de un mercado eficiente de baterías de segunda vida (SLB). Este giro hacia la servitización se alinea con la tendencia observada en industrias de bienes duraderos, donde las empresas buscan mantener control sobre los activos a lo largo de su ciclo de vida y capturar rentas mediante contratos de servicio recurrentes (Visnjic, Wiengarten, & Neely, 2022).

Desde la perspectiva microeconómica, las baterías representan un bien duradero cuya demanda se distribuye intertemporalmente, lo que genera tensiones entre los incentivos del productor y las expectativas del consumidor. Como argumentan Bulow (1982) y Waldman (2003), la existencia de mercados secundarios y la anticipación de mejoras tecnológicas pueden reducir el poder de mercado del fabricante, provocando canibalización intertemporal y precios por debajo del nivel óptimo de monopolio. Este dilema resulta particularmente relevante para la industria de baterías, donde la rápida innovación tecnológica acelera la depreciación y modifica la curva de valor residual del activo (Andreassen & Lind, 2024).

El análisis de esta interacción requiere, por tanto, un marco que combine la economía de los bienes duraderos, la teoría de juegos y el paradigma Estructura–Conducta–Desempeño (ECD). Dicho enfoque permite modelar la forma en que la estructura del mercado —competencia, regulación, estandarización— condiciona las decisiones estratégicas de las empresas y, en consecuencia, su desempeño económico y ambiental (Bain, 1956; Chinchilla-Guarín & García-Rendón, 2024). En este trabajo, se aplica este marco para examinar cómo los modelos BaaS y BaaP afectan la oferta de baterías de segunda vida (SLB), los costos nivelados de almacenamiento (LCOS-SLB) y las condiciones de adopción en América Latina, integrando evidencia empírica y modelamiento teórico.

En conjunto, este trabajo busca aportar evidencia y estructura analítica para comprender bajo qué condiciones económicas e institucionales BaaS puede favorecer la expansión de SLB, contribuyendo a decisiones empresariales y de política pública relevantes que aceleren la transición hacia una economía circular baja en carbono.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La aceleración de la electromovilidad coincide con caídas pronunciadas en el costo de las baterías de ion-litio y con cambios en la estructura industrial (fabricación de celdas, integración vertical, y viraje hacia químicas como LFP), que condicionan adopción de EV, valor residual y tiempos hasta alcanzar umbrales de estado de salud (SoH por sus siglas en inglés) compatibles con segunda vida (SLB) (BloombergNEF, 2025). La batería concentra una fracción significativa del costo total del EV y determina tanto el costo total de propiedad (TCO) del usuario como la recuperabilidad de las baterías al final de su primera vida útil (BloombergNEF, 2024).

En este contexto han surgido dos arreglos contractuales: BaaP (el consumidor “posee” la batería embebida en el precio del EV) y BaaS (la batería se arrienda como servicio con garantías). La elección entre BaaS y BaaP reasigna el riesgo tecnológico de degradación y obsolescencia, altera el TCO y puede modificar de manera significativa el flujo anual de packs recuperables para SLB (Andreassen & Lind, 2024). Desde la teoría microeconómica de bienes duraderos, las expectativas de precio futuro y el problema de canibalización afectan la decisión de compra o renovación y el poder de mercado del productor (Bulow, 1982). Sin embargo, no están claramente caracterizadas las fronteras económicas, en términos de precio de pack de baterías, degradación y garantías, bajo las cuales BaaS domina a BaaP desde la perspectiva del consumidor y de la cadena (fabricantes, regulador, utilities), ni su paso a LCOS-SLB y a la oferta anual de MWh de segunda vida hacia 2030 (BloombergNEF).

Para abordar este problema de manera estructurada, el trabajo se desarrolla en cuatro componentes analíticos coherentes con la secuencia causal del fenómeno estudiado. Primero, se evalúa la decisión del consumidor mediante un modelo de costo total de propiedad (TCO), comparando el acceso a la batería por compra versus servicio. Segundo, se modela la oferta potencial de baterías reutilizables mediante un enfoque stock-flujo que conecta ventas históricas de vehículos eléctricos con retiros y transición hacia segunda vida. Tercero, se examina la competitividad económica del almacenamiento a través del costo nivelado (LCOS) y su vínculo con la estructura industrial bajo el enfoque Estructura-Costo-Desempeño (ECD). Finalmente, se formaliza la interacción estratégica entre actores mediante teoría de juegos, con el fin de identificar condiciones institucionales y de política pública capaces de coordinar un equilibrio favorable a la trazabilidad y reutilización del activo.

La transición hacia una oferta eléctrica descarbonizada exige mecanismos de almacenamiento y flexibilidad que reduzcan la intermitencia y el costo de integración de renovables. En paralelo, la rápida caída del precio de los paquetes Li-ion (2013–2025) y las proyecciones a 2030 reconfiguran el costo total de propiedad de la electromovilidad y abren espacio para modelos contractuales alternativos y para la segunda vida (SLB) en usos estacionarios (BloombergNEF, 2024). El crecimiento sostenido de las ventas de EV confirma esta dinámica y permite modelar, con series globales y regionales, el flujo potencial de baterías hacia SLB (Statista, 2024).

La elección entre Batería-como-Producto (BaaP) y Batería-como-Servicio (BaaS) es, en esencia, una decisión de diseño de contratos sobre un bien durable intensivo en innovación. BaaS redistribuye el riesgo tecnológico de degradación y obsolescencia, típico de los bienes duraderos, desde el consumidor hacia el proveedor del servicio, afectando el TCO y el tiempo de reemplazo (Zhou, Pang, & Tang, 2025). Desde la teoría microeconómica de durables, las expectativas de precios futuros y los problemas de compromiso-canibalización del productor influyen en la adopción y en la estructura de precios (Waldman, 2003). Integrar estas ideas al caso de baterías permite derivar fronteras de indiferencia (cuotas BaaS “sostenibles” dada la senda de USD/kWh) y cuantificar sus efectos sobre la oferta anual de MWh para SLB y el LCOS-SLB bajo escenarios de precios y costos reales (BloombergNEF, 2024).

La estructura de la cadena (concentración por fabricantes de celdas, integración vertical y tipos de químicos usados), condiciona la formación de costos y la disponibilidad de packs recuperables y estandarizados. BaaS puede facilitar trazabilidad, recuperación sistemática y estandarización de baterías al final de la primera vida, mejorando tasas de reutilización y reduciendo fricciones transaccionales para SLB; estos mecanismos son especialmente valiosos en contextos con incertidumbre arancelaria o de política comercial que impactan los costos de la cadena (Zhou et al., 2025). Un análisis Estructura–Costo–Desempeño (ECD) con datos de participación, curvas de costo y despliegues proyectados permite identificar palancas empresariales y de política pública que minimizan LCOS-SLB y aceleran la adopción de almacenamiento distribuido (BloombergNEF, 2025).

La valorización del stock de baterías retiradas de EV mediante SLB y, posteriormente, reciclaje, es un pilar de la economía circular de la cadena Li-ion. Los informes sectoriales reportan el avance de capacidades de recolección, clasificación y recuperación de materiales, con implicaciones directas sobre el costo marginal futuro de packs y sobre métricas de sostenibilidad del sistema (Statista, 2024). Un esquema BaaS bien diseñado puede ordenar el flujo de baterías

hacia SLB, mejorar la calidad de los retornos y, en consecuencia, reducir el LCOS-SLB frente a adquisiciones fragmentadas bajo BaaP (Zhou et al., 2025).

En síntesis, esta investigación se enfoca en comprender cómo la decisión entre adquirir la batería como parte del vehículo o acceder a ella mediante un contrato de servicio afecta simultáneamente (i) el costo total esperado para el usuario durante la vida útil automotriz, (ii) la disponibilidad futura de baterías reutilizables para aplicaciones estacionarias y (iii) la competitividad económica del almacenamiento medida por costos nivelados. Adicionalmente, se plantea que la intervención pública puede ser determinante para superar fallas de coordinación, reducir asimetrías de información y crear condiciones de trazabilidad y estandarización que permitan que la reutilización de baterías sea escalable y segura. De este modo, el trabajo busca aportar evidencia para identificar bajo qué condiciones económicas e institucionales los modelos basados en servicio pueden fortalecer la economía circular en torno al almacenamiento energético.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar, con fundamentos de economía de bienes duraderos y datos observados, las condiciones bajo las cuales el modelo batería como servicio (Battery-as-a-Service, BaaS) domina al modelo batería como producto (Battery-as-a-Product, BaaP) para el consumidor, en el contexto de baterías utilizadas para el funcionamiento de vehículos eléctricos (EV), y cuantificar el impacto de esa elección sobre el flujo anual de baterías disponibles para segunda vida (SLB) y sobre el costo nivelado de almacenamiento con segunda vida (LCOS-SLB) en escenarios 2025–2030.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar, mediante un enfoque de costo total de propiedad (TCO) y valor presente, las condiciones bajo las cuales conviene para el usuario final optar por Battery-as-a-Service (BaaS) frente a Battery-as-a-Product (BaaP).
- Estimar y contrastar un LCOS simplificado para proyectos típicos de baterías de segunda vida (SLB) frente a baterías nuevas, mostrando cómo la estandarización, trazabilidad y coordinación asociadas a BaaS pueden reducir costos económicos relevantes frente a esquemas dispersos bajo BaaP.
- Identificar los factores que más influyen en la dominancia relativa de BaaS sobre BaaP mediante análisis de sensibilidad de los parámetros de costo y riesgo del modelo, incorporando análisis estadístico exploratorio adicional únicamente cuando los datos disponibles lo permitan.
- Representar los incentivos de fabricante, usuario y gobierno mediante una matriz de pagos ordinal y derivar equilibrios de Nash comparados (con y sin intervención), describiendo las condiciones institucionales bajo las cuales se coordina un equilibrio que aumente la oferta efectiva de SLB y contribuya a reducir el LCOS-SLB.

- Proponer recomendaciones concretas de política pública y estrategia de negocio, priorizadas por impacto y factibilidad, orientadas a facilitar la adopción de BaaS donde sea eficiente, fortalecer la trazabilidad y maximizar el flujo hacia SLB sin comprometer seguridad, desempeño ni sostenibilidad.

MARCO TEÓRICO

El desarrollo de la economía de las baterías de segunda vida (Second-Life Batteries, SLB) exige un marco teórico que integre los fundamentos de la economía circular, la teoría de bienes duraderos y los modelos estratégicos de servitización, permitiendo analizar cómo la transición de esquemas de propiedad hacia modelos de servicio (como BaaS) reconfigura la estructura de costos, los incentivos de mercado y el desempeño ambiental y financiero del almacenamiento energético. En particular, la comparación entre BaaS y Battery-as-a-Product (BaaP) se enmarca en una dinámica de innovación y cambio tecnológico acelerado, donde la degradación, la obsolescencia y el valor residual de las baterías condicionan la viabilidad económica de su segundo uso. Desde esta perspectiva, el marco teórico no solo aborda la sostenibilidad técnica y económica del SLB, sino también las implicaciones de política pública y de diseño contractual derivadas de las interacciones estratégicas entre fabricantes, operadores energéticos y reguladores. De este modo, la articulación entre los paradigmas de economía circular, teoría de bienes duraderos y estructura–costo–desempeño (ECD) permite construir una visión integral sobre cómo la evolución de los modelos de negocio en torno al almacenamiento redefine la frontera de eficiencia, riesgo y competitividad en la industria de baterías.

ECONOMÍA CIRCULAR Y SEGUNDO USO DE BATERÍAS (SLB)

La economía circular busca cerrar el ciclo de vida de los productos mediante estrategias como la reutilización, reparación y reciclaje, con el fin de minimizar residuos y maximizar el valor de los recursos. En el caso de las baterías de vehículos eléctricos (VE), el enfoque de segunda vida (Second-Life Batteries, SLB) representa una práctica piloto de economía circular, donde las baterías se reutilizan en aplicaciones estacionarias antes de ser recicladas, generando beneficios ambientales y económicos. Esta práctica extiende la vida útil del activo, aplaza impactos ambientales del fin de vida y puede mejorar la rentabilidad del almacenamiento bajo condiciones de diagnóstico de salud confiable, estandarización y marcos regulatorios adecuados (Harper et al., 2019)

BIENES DURADEROS

En microeconomía, un bien perecedero es aquel cuyo consumo se agota en un solo periodo o en un número muy reducido de usos, de modo que la utilidad generada coincide

prácticamente con el momento de compra y consumo (Varian, 2014). En contraste, un bien duradero presta servicios a lo largo de múltiples periodos; por ello, las decisiones del consumidor incluyen no solo la cantidad adquirida en el presente, sino también el horizonte de uso y el momento óptimo de reemplazo del activo (Waldman, 2003). Formalmente, mientras el bien perecedero se modela como un flujo de consumo C_t que no se acumula, el bien duradero se representa como un stock D_t que se deprecia en el tiempo, generando un flujo de servicios recurrente en la función de utilidad Inter temporal.

Esta distinción es especialmente relevante en el caso de las baterías de ion-litio para vehículos eléctricos (EV). La batería se comporta como un bien duradero intensivo en capital: requiere una inversión inicial elevada, presta servicios de almacenamiento energético durante varios años y experimenta un proceso de degradación del estado de salud (SoH), el cual determina su valor residual y su aptitud para uso automotriz o estacionario (Harper et al., 2019; Martínez-Laserna et al., 2018). A la vez, varios costos asociados a su operación, como energía de recarga, ciclos de mantenimiento y ciertos costos transaccionales; se asemejan a flujos ligados a bienes perecederos, pues se materializan periódicamente y no generan acumulación en forma de stock. En conjunto, esto justifica modelar la batería como un activo duradero con flujos de costos y servicios Inter temporales, más que como un gasto de consumo corriente.

Un modelo estándar de la teoría de bienes duraderos considera a un consumidor que maximiza utilidad Inter temporal escogiendo consumo perecedero C_t y acumulación del bien duradero D_t , sujeto a restricciones de ingreso y depreciación (Coase, 1972; Waldman, 2003). En tiempo discreto, el problema se expresa como:

$$\max_{\{c_t, x_t\}_{t \geq 0}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t, s(D_t))$$

Sujeto a:

$$D_{t+1} = (1 - \delta)D_t + x_t$$

$$a_{t+1} = (1 + r)(a_t + y_t - c_t - px_t)$$

Donde:

- C_t : es el consumo perecedero,
- D_t : es la acumulación del bien duradero,

X_t : es la inversión en nuevas unidades del durable (por ejemplo: un pack de baterías),
 δ : es la tasa efectiva de depreciación (degradación + obsolescencia),
 p : es el precio del durable,
 a_t : es el stock de activos financieros,
 y_t : es el ingreso,
 $s(D_t)$: es el flujo de servicios derivados del stock (autonomía, capacidad útil, potencia).
 r : es el de costo de oportunidad (tasa) de los activos financieros en un periodo t ,

Mientras el consumo perecedero c_t agota su utilidad en cada periodo, el bien duradero D_t genera servicios repetidos en el tiempo, lo que formaliza la diferencia entre perecedero y duradero.

La literatura enfatiza que el parámetro económico relevante es el costo de uso del bien duradero, más que su precio de compra aislado. Jorgenson (1963) definió este costo como la suma de depreciación, mantenimiento y costo de oportunidad del capital. Este concepto se traslada de forma natural al Costo Total de Propiedad (TCO) de un pack de baterías, donde el propietario internaliza deterioro, costos acumulados y riesgos tecnológicos.

La introducción de modelos Battery-as-a-Service (BaaS) modifica este problema clásico: en vez de pagar un precio inicial px_t y mantener el stock D_t , el consumidor paga una tarifa periódica Fee_{BaaS} a cambio del servicio de almacenamiento, mientras la propiedad del activo, su depreciación y riesgos se trasladan al proveedor (Andreassen & Lind, 2024; Zhou, Pang, & Tang, 2025).

CONTRATOS, SERVITIZACIÓN Y ELECCIÓN BAAS VS BAAP

El paso de producto a servicio (servitización) traslada parte del riesgo tecnológico desde el consumidor al proveedor, mediante cuotas periódicas, garantías extensas y, a veces, swap rápido de baterías. BaaS puede suavizar la exposición del usuario a shocks de degradación y a la incertidumbre tecnológica, a costa de una tarifa recurrente que internaliza mantenimiento, sustitución y logística (Zhou, Pang, & Tang, 2025).

DEPRECIACIÓN, VALOR RESIDUAL Y APRENDIZAJE TECNOLÓGICO

El valor residual de un EV está influido por la trayectoria tecnológica (mejoras de densidad, coste y durabilidad) y por el ritmo de adopción masiva, que afecta expectativas y liquidez del mercado de segunda mano (Andreassen & Lind, 2024). En presencia de avances rápidos, la

depreciación del activo puede acelerarse por obsolescencia relativa, incluso con buena condición física.

ESTRUCTURA- COSTO - DESEMPEÑO

El paradigma Estructura–Costos–Desempeño (ECD) aparece como una evolución crítica del esquema clásico Estructura–Conducta–Desempeño (SCP) de la Escuela de Harvard (Mason, 1939; Bain, 1956). Mientras SCP se concentra en el análisis de la conducta estratégica y las consecuencias sobre los mercados, el ECD incorpora explícitamente el análisis de los costos como eje central para entender la dinámica competitiva, especialmente en sectores industriales con elevada intensidad de capital, como el almacenamiento energético.

Los costos, aquí, no son simplemente una variable económica más, sino un factor de decisión clave que influye en la estructura del mercado y determina el desempeño tecnológico y financiero. Este paradigma ha sido impulsado por la creciente evidencia empírica y las transformaciones institucionales en mercados regulados, donde la conducta empresarial a menudo está estrictamente condicionada por reglas externas y no es plenamente libre.

En esencia, ECD reconoce que:

- ✓ La estructura de mercado (número de competidores, concentración, barreras de entrada, integración vertical) condiciona la base y dinámica de costos de las empresas.
- ✓ Los costos (incluyendo costos fijos, variables, de transacción y de ciclo de vida) estructuran las estrategias empresariales y las opciones de inversión.
- ✓ El desempeño (eficiencia técnica, rentabilidad, innovación, calidad del servicio) resulta directamente del equilibrio entre estructura del mercado y capacidad de gestionar costos.
- ✓ Este enfoque es particularmente pertinente en sistemas complejos de almacenamiento energético donde la tecnología, la regulación y la economía se entrecruzan.

En infraestructura energética, donde predominan costos hundidos, economías de escala/red y regulación sectorial, el vínculo clave entre estructura y desempeño está mediado por la función de costos (Joskow & Schmalensee, 1983). Por ello, se propone el modelo de ECD: Estructura → Costos → Desempeño. Este re-etiquetado conserva la lógica causal del SCP pero centra el análisis en el costo nivelado del servicio y la curva de aprendizaje como variables puente entre mercado y resultados.

LCOS DE SEGUNDA VIDA

El LCOS resume el costo nivelado del almacenamiento por unidad de energía entregada, integrando CAPEX (adquisición del SLB, reacondicionamiento, BOS), OPEX (O&M, testing), degradación y eficiencia, y el WACC. Metodologías reconocidas para LCOS muestran cómo la curva de costos de tecnologías de almacenamiento (incluidos escenarios con baterías usadas) depende de supuestos de ciclos anuales, profundidad de descarga, vida remanente y perfil de ingresos (Schmidt et al., 2019; Zakeri & Syri, 2015). En mercados con demanda de almacenamiento creciente, la BNEF (2024) destaca que la expansión de baterías y el desarrollo de mercados de servicios complementarios mejoran la captura de valor del almacenamiento, abriendo espacio para SLB cuando su precio all-in permite un LCOS competitivo frente a alternativas nuevas.

MODELOS ESTRATÉGICOS:

- TEORÍA DE JUEGOS

La teoría de juegos es un marco de la microeconomía que analiza decisiones estratégicas cuando el resultado de cada agente depende también de las decisiones de los demás. Un juego se caracteriza por jugadores, estrategias y pagos asociados a cada combinación de acciones; el equilibrio de Nash ocurre cuando ningún jugador tiene incentivos a desviarse unilateralmente, dado lo que hacen los otros (Gibbons, 1992). En esta investigación, la teoría de juegos permite representar la interacción entre fabricantes, usuarios y gobierno para explicar por qué, sin intervención, pueden prevalecer decisiones privadas favorables a BaaS y cómo políticas públicas pueden modificar incentivos y coordinar un equilibrio más compatible con la economía circular vía BaaS y el desarrollo de SLB.

- JUEGOS DE COORDINACIÓN Y DISEÑO DE MERCADOS

Los juegos de coordinación son una clase de juegos no cooperativos en los que los agentes obtienen mayores beneficios cuando sus decisiones son compatibles entre sí. En estos juegos, el problema central no es competir, sino coordinar expectativas y acciones para alcanzar un resultado mutuamente conveniente. Un rasgo clave es que suelen existir múltiples equilibrios de Nash, algunos eficientes y otros ineficientes, lo que implica que el mercado puede permanecer en un equilibrio subóptimo debido a incertidumbre, falta de información común o altos costos de transición hacia un estándar superior (Gibbons, 1992). En sectores tecnológicos, estos juegos son relevantes porque la eficiencia depende de compatibilidad, estandarización y externalidades de red.

En el mercado de baterías, la reutilización hacia baterías de segunda vida (SLB) requiere condiciones mínimas de trazabilidad, certificación, calidad y logística inversa. Si estas condiciones no se implementan de forma coordinada, el mercado puede no escalar aun cuando exista potencial económico, reflejando una falla típica de coordinación. En este contexto, la literatura de diseño de mercados aporta un marco para “ajustar las reglas del juego” mediante instituciones, estándares y mecanismos que reduzcan fricciones y alineen incentivos. El diseño de mercados es especialmente útil cuando los precios no bastan para garantizar eficiencia por asimetrías de información o fallas de coordinación (Roth, 2002). Aplicado a baterías, instrumentos como estándares técnicos, sistemas de trazabilidad, responsabilidad extendida del productor y reglas para facilitar la recuperación del activo pueden desplazar el equilibrio hacia resultados más eficientes, aumentando la disponibilidad de SLB y fortaleciendo la economía circular.

POLÍTICAS PÚBLICAS E INCENTIVOS

La adopción de baterías de segunda vida (SLB) y de modelos Battery-as-a-Service (BaaS) está fuertemente condicionada por el diseño de políticas públicas que regulan la trazabilidad, la asignación de riesgos y los incentivos económicos a lo largo del ciclo de vida de la batería. Dado que la propiedad dispersa bajo BaaS puede fragmentar el retorno de baterías usadas y elevar costos de verificación, la intervención estatal puede corregir fallas de coordinación y asimetrías de información mediante instrumentos como responsabilidad extendida del productor, estándares de seguridad y reacondicionamiento, y mecanismos de trazabilidad digital (European Commission, 2023; Harper et al., 2019). Al reducir costos de transacción y riesgos operativos, estas políticas pueden desplazar el equilibrio hacia esquemas más compatibles con economía circular y mejorar el desempeño económico medido por LCOS-SLB (Schmidt et al., 2019). Además, la viabilidad financiera del almacenamiento depende del marco contractual y regulatorio que define ingresos y distribución de riesgos en proyectos energéticos, lo cual es especialmente relevante en mercados emergentes (Chinchilla-Guarín & García-Rendón, 2024).

STOCK-FLUJO DE BATERÍAS HACIA SLB Y ROL DEL SOH

El modelo stock-flujo permite representar de manera estructurada la dinámica de las baterías de vehículos eléctricos (EV) a lo largo de su ciclo de vida, diferenciando los flujos de entrada, principalmente asociados a las nuevas ventas de EV, y los flujos de salida, que ocurren cuando los sistemas de almacenamiento alcanzan el fin de su vida útil automotriz. Esta aproximación posibilita estimar la disponibilidad futura de baterías para su reutilización en aplicaciones

estacionarias (Second-Life Batteries, SLB) o su redirección hacia procesos de reciclaje. BloombergNEF (2024) destaca que la magnitud de este flujo dependerá tanto del crecimiento del parque automotor eléctrico como del rezago temporal promedio de entre 8 y 12 años que media entre la primera y la segunda vida útil.

En este contexto, el State of Health (SoH) funciona como variable de enlace entre ambos estados del sistema. Cuando el SoH desciende típicamente por debajo de 70–80 % de su capacidad nominal, las baterías se retiran del vehículo y se evalúan para determinar su destino final (Harper et al., 2019; Zakeri & Syri, 2015). Su medición permite caracterizar la condición física y electroquímica del pack, facilitando la toma de decisiones sobre reutilización o reciclaje, y sirve como indicador clave para modelar la proporción de unidades que transitan hacia la segunda vida frente a las que se descartan (Andreassen, 2024).

El enfoque stock–flujo no solo contribuye a dimensionar la oferta potencial de baterías reutilizables, sino también a analizar la estructura emergente del mercado de servicios asociados, como los esquemas Battery-as-a-Service (BaaS). Estos modelos integran información del SoH y mecanismos de retorno, configurando circuitos cerrados de capital y materiales que son esenciales para evaluar los impactos económicos y ambientales del segundo uso (Zhou, 2025). En consecuencia, el marco stock–flujo actúa como una herramienta de enlace entre la teoría del ciclo de vida tecnológico y las estrategias de economía circular en el sector energético.

VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL SEGUNDO USO

Diversos estudios indican que, al ser retiradas del servicio automotriz, muchas baterías de VE conservan entre el 70% y el 80 % del estado de salud (SoH), lo que permite su reutilización en aplicaciones estacionarias menos exigentes antes del reciclaje (Martinez-Laserna et al., 2018). Además, su integración en sistemas de carga rápida puede reducir el costo nivelado de electricidad (LCOE) y la huella de calentamiento global (GWP). En sistemas híbridos solar-batería, la condición de umbral puede aproximarse a que el precio de mercado del SLB sea sustancialmente inferior al de una batería nueva (regla práctica $< \sim 80\%$), siempre que el ciclo de vida remanente cubra la energía despachada a un LCOS competitivo (Zakeri & Syri, 2015).

ESTRUCTURA DE ANÁLISIS

Este trabajo se desarrolla mediante cuatro módulos integrados, organizados de manera secuencial para conectar la decisión individual del usuario con sus implicaciones económicas e institucionales sobre el mercado de baterías en EV y su transición hacia esquemas circulares. Cada módulo entrega resultados parciales que sirven como base para el módulo siguiente, consolidando un análisis coherente entre fundamentos, dinámica de oferta y desempeño económico. En consecuencia, este análisis está dividido en cuatro módulos: (A) costo total de propiedad del consumidor (TCO) y comparación entre compra versus servicio; (B) modelo stock-flujo para estimar disponibilidad de baterías de segunda vida; (C) evaluación de competitividad económica mediante LCOS y su vínculo con la estructura industrial bajo el enfoque ECD; y (D) juego estratégico entre fabricante, usuario y gobierno para analizar coordinación e instrumentos de política pública.

MÓDULO A: TCO DEL CONSUMIDOR (BaaS vs BaaP)

Fundamentación económica del TCO:

La decisión entre BaaS y BaaP se basa en minimizar el costo total de propiedad bajo descuento Inter temporal. El TCO integra desembolso inicial (precio del vehículo y batería), pagos operativos (tarifa de servicio), mantenimiento y valor residual. Comparar alternativas por TCO es un principio microeconómico de elección bajo restricciones presupuestarias y horizonte finito. Cuando $TCO_{BaaS} \approx TCO_{BaaP}$, la decisión se desplaza a factores de riesgo, liquidez y flexibilidad contractual. Esta lógica es estándar en evaluación de activos y contratos de servicio.

$$TCO(BaaP) = P_{base(EV+Pack)} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t} + C_{MtnVE-t} + C_{MtnPack-t} + C_{RiskVE-t} + C_{RiskPack-t}}{(1+r)^t} - \frac{V_{resid_{EV+Pack}}}{(1+r)^n}$$

$$TCO(BaaS) = P_{base(EV)} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t} + C_{MtnVE-t} + Fee_{BaaS-t} + C_{RiskVE-t}}{(1+r)^t} - \frac{V_{resid_{EV}}}{(1+r)^n}$$

Descomponiendo:

$$TCO(BaaP) = P_{baseEV} + P_{pack} - \frac{V_{resid_{EV}}}{(1+r)^n} - \frac{V_{resid_{Pack}}}{(1+r)^n} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnVE}}{(1+r)^t}$$

$$+ \sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnPack-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskVE-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskPack-t}}{(1+r)^t}$$

Mientras que,

$$TCO(BaaS) = PbaseEV + \sum_{t=1}^n \frac{Fee_{BaaS}}{(1+r)^t} - \frac{Vresid_{EV}}{(1+r)^n} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnVE}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskVE-t}}{(1+r)^t}$$

Donde:

TCO	Costo total para el propietario de poseer un vehículo eléctrico durante su primera vida útil (limitada a la primera vida útil de las baterías).
PbaseEV	Precio Base Vehículo Eléctrico sin baterías
Ppack	Precio promedio de baterías nuevas de ion-litio del vehículo
Vresid_{EV}	Valor al cual se vende el vehículo al final de la primera vida útil de las baterías
Vresid_{pack}	Valor al cual se vende el pack de baterías al final de la primera vida útil
C_{Energy-t}	Costo de la energía usada para recargar las baterías en el periodo t
C_{MtnVE-t}	Costo del mantenimiento del vehículo durante el periodo t
C_{MtnPack-t}	Costo del mantenimiento de las baterías durante el periodo t
C_{RiskVE-t}	Costo asociado al riesgo de daño, deterioro o pérdida total del vehículo en periodo t
C_{RiskPack-t}	Costo asociado al riesgo de daño, deterioro o pérdida total de las baterías en periodo t
Fee_{BaaS-t}	Costo periódico de arrendamiento de baterías como servicio en periodo t
r	Tasa a la cual se descontarán los flujos futuros.
t	Año

El modelo de BaaS será atractivo cuando se cumpla que:

$$TCO(BaaP) > TCO(BaaS)$$

Es decir,

$$\begin{aligned} & PPbaseEV + Ppack - \frac{Vresid_{EV}}{(1+r)^n} - \frac{Vresid_{pack}}{(1+r)^n} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnVE}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnPack-t}}{(1+r)^t} \\ & + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskVE-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskPack-t}}{(1+r)^t} \\ & > PbaseEV + \sum_{t=1}^n \frac{Fee_{BaaS-t}}{(1+r)^t} - \frac{Vresid_{EV}}{(1+r)^n} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{Mtn}}{(1+r)^t} \\ & + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskVE-t}}{(1+r)^t} \end{aligned}$$

Con el fin de identificar los determinantes económicos específicos que influyen en la elección del consumidor entre los esquemas Battery-as-a-Product (BaaP) y Battery-as-a-Service (BaaS), se procede a restar de ambos lados de la desigualdad aquellos componentes del TCO que son comunes a ambas alternativas. Estos factores, al estar presentes de manera idéntica en las dos expresiones de costo total, no afectan la decisión

relativa del usuario, dado que no alteran la comparación marginal entre los esquemas contractuales.

En particular, se excluyen los siguientes cinco componentes:

- $PbaseEV$
- $\frac{Vresid_{EV}}{(1+r)^n}$
- $\sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t}}{(1+r)^t}$
- $\sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnVE}}{(1+r)^t}$
- $\sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskVE-t}}{(1+r)^t}$

Precio base del vehículo eléctrico sin baterías ($PbaseEV$).

Este término representa el costo de adquisición del vehículo excluyendo el paquete de baterías. Dado que el chasis, el sistema de tracción y los demás componentes del vehículo son idénticos bajo BaaP y BaaS, este precio inicial no introduce ninguna diferencia económica relevante entre ambas opciones desde el punto de vista del consumidor. En consecuencia, no constituye un factor determinante en la elección entre propiedad y servicio de la batería.

Valor residual del vehículo sin baterías ($\frac{Vresid_{EV}}{(1+r)^n}$).

Este componente refleja el valor esperado de reventa del vehículo al final del horizonte de análisis, descontado al valor presente. Al no depender del régimen de tenencia de la batería, el valor residual del vehículo es equivalente en ambos esquemas y, por tanto, no incide en la comparación relativa entre BaaP y BaaS.

Costo de la energía para la recarga ($\sum_{t=1}^n \frac{C_{Energy-t}}{(1+r)^t}$).

El consumo energético del vehículo está determinado por patrones de uso, eficiencia tecnológica y precios de la electricidad, factores que son independientes de la modalidad contractual de la batería. En consecuencia, el costo de la energía es idéntico bajo ambos esquemas y no constituye un elemento diferenciador en la decisión del usuario.

Costo de mantenimiento del vehículo sin baterías $(\sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnVE-t}}{(1+r)^t})$.

Este término incluye los costos de mantenimiento asociados al vehículo (excluyendo explícitamente la batería) tales como sistemas mecánicos, electrónicos y estructurales. Dado que estos costos no varían entre BaaP y BaaS, su inclusión en ambas expresiones de TCO no afecta la elección relativa del consumidor.

Costo asociado al riesgo del vehículo sin baterías $(\sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskVE-t}}{(1+r)^t})$.

Este componente captura los riesgos de daño, deterioro o pérdida total del vehículo, distintos de aquellos asociados a la batería. Al ser riesgos inherentes al activo vehicular y no al esquema de provisión de la batería, su magnitud es equivalente en ambos modelos y, por ende, no influye en la decisión entre BaaP y BaaS.

La eliminación de estos factores comunes permite reducir la comparación del TCO a aquellos elementos estrictamente vinculados a la batería, tales como su precio de adquisición, valor residual, costos de mantenimiento, riesgos tecnológicos y tarifas de servicio. De esta manera, la desigualdad resultante aísla el núcleo económico de la decisión del consumidor, facilitando una interpretación clara de la disyuntiva entre propiedad del activo y contratación del servicio, y sentando las bases para el análisis posterior de sus implicaciones sobre la oferta de baterías de segundo uso.

Como resultado de la exclusión de las variables comunes a ambos esquemas contractuales, la condición de preferencia del consumidor entre Battery-as-a-Product (BaaP) y Battery-as-a-Service (BaaS) se reduce a la comparación entre los costos económicos asociados exclusivamente al paquete de baterías. Formalmente, la desigualdad resultante puede expresarse como:

$$P_{pack} - \frac{V_{resid_{pack}}}{(1+r)^n} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnPack-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskPack-t}}{(1+r)^t} > \sum_{t=1}^n \frac{Fee_{BaaS-t}}{(1+r)^t}$$

Esta expresión establece que el modelo BaaS será económicamente preferible para el consumidor cuando el valor presente de las tarifas del servicio sea inferior al costo

económico total de poseer la batería bajo BaaP.

Por definición, el valor presente de un flujo X_t se expresa como:

$$\sum_{t=1}^n \frac{X_t}{(1+r)^t} = \text{Valor Presente de } X = VP(X)$$

lo cual permite reescribir la desigualdad anterior de forma compacta como:

$$TCO(BaaP) > TCO(BaaS)$$

Se dará cuando se cumpla que.

$$P_{pack} - VP(Vresid_{pack}) + VP(Mtm_{pack}) + VP(Risk_{pack}) > VP(Fee)$$

A partir de esta nueva ecuación de desigualdad, es posible realizar análisis desde dos puntos de vista: de un modo particular con datos observados y de un modo general con datos observados y proyectados.

De un modo particular:

El término $P_{pack} - VP(Resid_{pack})$ puede interpretarse como la depreciación económica del paquete de baterías durante su primera vida útil, la cual se denota como:

$$DP_{pack} = P_{pack} - VP(Resid_{pack})$$

La estimación del valor residual de una batería de ion-litio depende fundamentalmente de su degradación técnica, usualmente medida a través del State of Health (SoH), así como del horizonte temporal de uso considerado. La evidencia empírica disponible en la literatura académica y en reportes industriales converge en que el final de la primera vida útil de una batería para vehículos eléctricos se sitúa típicamente cuando su SoH cae por debajo de un umbral operativo del 70–80 % de la capacidad nominal.

Desde la perspectiva industrial, los principales fabricantes de vehículos eléctricos establecen garantías comerciales alineadas con dichos umbrales. En particular, BYD ofrece garantías de batería de 8 años o entre 150.000 y 200.000 km, condicionadas a que la capacidad remanente no descienda por debajo de aproximadamente 70 %, lo cual refleja un criterio ampliamente adoptado en la industria para definir el fin de la primera vida útil del paquete (BYD Auto, 2023).

La literatura científica respalda esta práctica. Estudios experimentales y revisiones sistemáticas

muestran que, bajo condiciones normales de operación, las baterías de ion-litio utilizadas en vehículos eléctricos alcanzan un SoH cercano al 70–80 % tras 8 a 12 años de uso, dependiendo del régimen de carga, profundidad de descarga y condiciones térmicas (Martinez-Laserna et al., 2018; Harper et al., 2019). Estos trabajos constituyen una de las principales referencias académicas en el análisis de degradación y reutilización de baterías automotrices.

Adicionalmente, desde una perspectiva económica, BloombergNEF documenta que, al final de su primera vida útil, los paquetes de baterías conservan un valor residual positivo, generalmente estimado entre 10 % y 30 % del costo inicial, debido a su potencial reutilización en aplicaciones de almacenamiento estacionario (second-life batteries) (BloombergNEF, 2024). Este valor residual depende tanto del estado técnico remanente como de las condiciones del mercado secundario de almacenamiento energético.

Con fines conservadores y en coherencia con la práctica industrial y la evidencia empírica disponible, este estudio adopta un horizonte de análisis de 10 años y asume un valor residual equivalente al 10 % del precio de un paquete nuevo, lo cual permite evitar sobreestimar los beneficios económicos asociados a la propiedad de la batería y proporciona una base prudente para la comparación entre los esquemas BaaP y BaaS; lo que implica:

$$VP(Resid_{pack}) = 0,1 * P_{pack}$$

y, por tanto,

$$DP_{pack} = P_{pack} - 0,1 * P_{pack} = 0,9 * P_{pack}$$

Por otro lado, de acuerdo con BloombergNEF (2024), el costo acumulado promedio de mantenimiento de baterías de ion-litio durante su vida útil representa aproximadamente 2,6 % del costo total del pack, incluyendo sistemas de gestión térmica, electrónica de potencia y reemplazos parciales de módulos. En consecuencia:

$$VP(Mtm_{pack}) = 0,026 * P_{pack}$$

El valor presente del riesgo asociado al paquete de baterías se modela como el producto entre la probabilidad acumulada de fallas severas y el precio del pack:

$$VP(Risk_{pack}) = \%Fallos_{pack} * P_{pack}$$

Este término captura eventos como fallas prematuras, accidentes térmicos o degradación acelerada no cubierta por garantías, los cuales son internalizados por el consumidor bajo BaaP y transferidos al proveedor bajo BaaS.

Sustituyendo los valores anteriores en la desigualdad principal, se obtiene:

$$0,9 * P_{pack} + 0,026 * P_{pack} + \%Fallos_{Pack} * P_{pack} > VP_{fee}$$

Lo que puede expresarse de forma compacta como:

$$(0,926 + \%Fallos_{Pack}) * P_{pack} > VP_{fee}$$

Equivalente,

$$TCO_{BaaS} < TCO_{BaaP} \Leftrightarrow VP_{fee} < (0,926 + \%Fallos_{Pack}) * P_{pack}$$

Tabla 1. Variables utilizadas en el estudio

Variable	Siglas	Definición	Signo Esperado	Unidad de Medida	Fuente
Costo Total de Propiedad	<i>TCO</i>	Costo Total de Propiedad	+	USD/kWh	Calculado
Precio del Pack de baterías	<i>P_{pack}</i>	Precio promedio de baterías nuevas de ion-litio del vehículo	+	USD/kWh	IRENA, BNEF, informes gubernamentales, Strata
Baterías que Fallan	<i>%Fallos_{pack}</i>	Porcentaje del Pack de Baterías que fallan durante su vida útil	+	%	U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office

Fuente: Elaboración propia.

En términos económicos, la condición derivada del modelo implica que, para que el esquema Battery-as-a-Service (BaaS) resulte preferible para el consumidor frente a la adquisición de la batería como producto (Battery-as-a-Product, BaaP), el valor presente neto de las tarifas del servicio de baterías debe ser inferior al costo económico esperado de poseer el paquete de baterías. Dicho costo esperado incorpora, por una parte, la depreciación efectiva del activo — aproximada en este estudio como el 92,6 % del precio de una batería nueva, resultado de la depreciación neta y los costos acumulados de mantenimiento— y, por otra, el costo asociado al riesgo de falla o pérdida prematura del paquete de baterías durante su vida útil.

Formalmente, esta condición puede expresarse como:

$$VP_{fee} < (0,926 + \%Fallos_{pack}) * P_{pack}$$

Esta expresión indica que el atractivo económico del esquema BaaS aumenta a medida que el precio del paquete de baterías es más elevado o cuando el consumidor enfrenta una mayor probabilidad de fallas técnicas, dado que ambos factores incrementan el costo esperado de la propiedad del activo bajo el esquema BaaS. En este sentido, BaaS actúa como un mecanismo de transferencia del riesgo tecnológico y de obsolescencia desde el consumidor hacia el proveedor del servicio.

Para hacer este ejercicio aún más particular, se usa el reporte de Vehicle Technologies Office del U.S. Department of Energy que hace referencia a la investigación de Nazman (2023), el riesgo asociado a la pérdida de packs de baterías en los últimos años es:

Tabla 2. Reemplazos de baterías de vehículos eléctricos (EV) debido a fallas, años modelo (MY) 2011–2023

Modelo	Reemplazo de Baterías
2011	7,5%
2012	3,6%
2013	4,4%
2014	3,9%
2015	1,6%
2016	0,3%
2017	0,1%
2018	0,4%
2019	0,2%
2020	0,1%
2021	0,5%
2022	0,3%
2023	0,1%

Nota: No incluye reemplazos por campañas masivas de los fabricantes. Vehículos híbridos no están incluidos.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Nazman (2023).

Para operacionalizar esta condición, el análisis emplea datos empíricos observados sobre reemplazos de baterías por fallas y precios promedio de paquetes de baterías para el período 2011–2024. En particular, para el año 2024 se incorporan los valores más recientes disponibles: una tasa observada de reemplazo de baterías del 0,1 %, consistente con la evidencia de madurez

tecnológica del sector, y un precio promedio del pack de USD 115/kWh, de acuerdo con BloombergNEF: Lithium-Ion Batteries – State of the Industry 2024 (BloombergNEF, 2024).

Estos valores permiten calcular, para cada cohorte anual de vehículos eléctricos, el umbral máximo del valor presente de la tarifa del servicio que hace indiferente al consumidor entre los esquemas BaaS y BaaP. En consecuencia, los resultados muestran que la rápida reducción en el precio de las baterías y la disminución sostenida de las tasas de fallas han reducido progresivamente el espacio económico en el cual el modelo BaaS resulta dominante desde una perspectiva estrictamente basada en costos, reforzando el papel de la incertidumbre tecnológica, la aversión al riesgo y la transferencia contractual del mismo como determinantes centrales de la adopción de baterías como servicio.

Tabla 3. Cálculo del VP_Fee 2011–2024

Modelo	Reemplazo de Baterías	Precio del Pack (\$/kWh)	VP_fee debe ser menor a: (\$/kWh)
2011	7,5%	\$ 1.079	\$ 1.080
2012	3,6%	\$ 848	\$ 815
2013	4,4%	\$ 780	\$ 757
2014	3,9%	\$ 692	\$ 668
2015	1,6%	\$ 448	\$ 422
2016	0,3%	\$ 345	\$ 321
2017	0,1%	\$ 258	\$ 239
2018	0,4%	\$ 211	\$ 196
2019	0,2%	\$ 183	\$ 170
2020	0,1%	\$ 160	\$ 148
2021	0,5%	\$ 150	\$ 140
2022	0,3%	\$ 161	\$ 149
2023	0,1%	\$ 139	\$ 129
2024	0,1%	\$ 115	\$ 107

Fuente: Elaboración propia con información de BNEF (2024) y Nazman (2023).

Gráficamente,

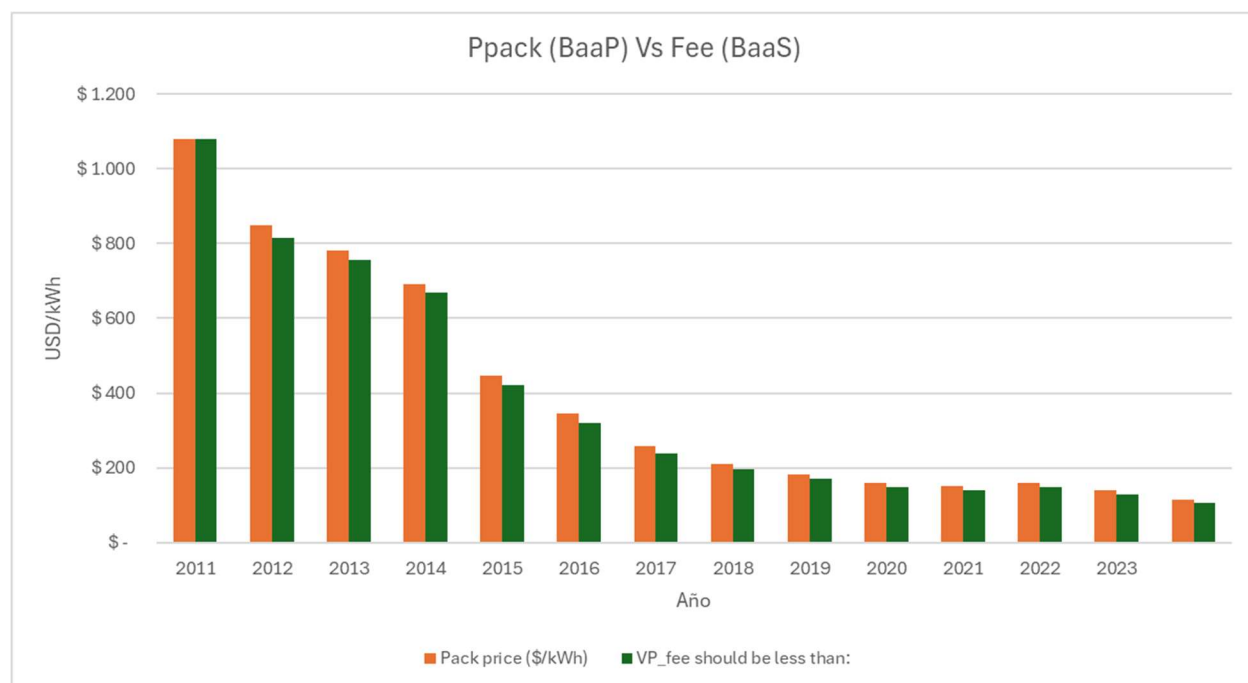


Ilustración 1. Ppack (BaaP) vs Fee (BaaS)
Fuente propia

Los resultados empíricos presentados muestran de manera consistente que la rápida reducción del costo de los paquetes de baterías nuevas (BaaP) ha tenido un efecto directo y disciplinante sobre la viabilidad económica del esquema Battery-as-a-Service (BaaS). En particular, a medida que el precio del pack de baterías por kWh disminuye de forma sostenida entre 2011 y 2024, el valor presente máximo del fee que haría indiferente al consumidor entre BaaS y BaaP también se reduce de manera proporcional.

Este resultado confirma la intuición microeconómica derivada del modelo TCO: cuando el activo subyacente (la batería en este caso) se vuelve más barato y confiable, el costo esperado de la propiedad disminuye, reduciendo el espacio económico en el cual el consumidor estaría dispuesto a pagar una prima por transferir el riesgo al proveedor del servicio. En consecuencia, el esquema BaaS enfrenta una presión estructural a la baja sobre sus tarifas, obligando a los proveedores a ofrecer precios cada vez más competitivos para mantener su atractivo frente a la compra directa de la batería.

Asimismo, la evidencia muestra que la caída simultánea en las tasas de reemplazo por fallas refuerza este efecto. A partir de 2017, cuando las tasas observadas de reemplazo se estabilizan en niveles cercanos al 0,1 – 0,2 %, el componente de riesgo asociado a la propiedad del pack

pierde relevancia cuantitativa. Esto implica que el valor económico de la transferencia de riesgo, el cual es uno de los principales argumentos a favor de BaaS, se reduce significativamente en mercados maduros, desplazando la competencia hacia factores distintos del precio, tales como flexibilidad contractual, servicios complementarios, garantías ampliadas o integración con soluciones de almacenamiento de segundo uso.

En términos dinámicos, los resultados sugieren que el modelo BaaS es intrínsecamente más atractivo en las etapas tempranas del ciclo tecnológico, cuando los precios de las baterías son elevados y la incertidumbre sobre su durabilidad es alta. A medida que la tecnología madura, los costos caen y la confiabilidad aumenta, el umbral económico que justifica BaaS se contrae, limitando su adopción a nichos específicos de usuarios con alta aversión al riesgo, restricciones de liquidez o necesidades particulares de flexibilidad.

Finalmente, este comportamiento tiene implicaciones estructurales relevantes para el desarrollo del mercado de baterías de segundo uso. A medida que el esquema BaaP se vuelve dominante desde la perspectiva del consumidor, aumenta la probabilidad de que los propietarios internalicen el valor residual del pack, fortaleciendo la oferta potencial de baterías para aplicaciones estacionarias. En contraste, un modelo BaaS sostenible en el largo plazo requerirá estrategias de captura de valor más allá del simple arrendamiento, integrando la gestión del ciclo de vida completo de la batería, incluyendo su reutilización y reciclaje, como fuentes adicionales de rentabilidad.

De un modo general:

Regresando al término,

$$P_{pack} - VP(V_{resid_{pack}}) + VP(M_{tm_{pack}}) + VP(R_{isk_{pack}}) > VP(Fee)$$

que debe cumplirse para que,

$$TCO(BaaP) > TCO(BaaS)$$

Y escribiéndolo en términos de sus ecuaciones:

$$VP(Fee) < P_{pack} - \frac{V_{resid_{pack}}}{(1+r)^n} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{MtnPack-t}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{RiskPack-t}}{(1+r)^t}$$

Es posible anticipar los efectos de VP(Fee) respecto a las variables que lo componen,

Tabla 4. Sensibilidad de las variables sobre VP del Fee (BaaS)

Variable		Comportamiento	Efecto sobre VP(Fee)
Costo del Pack	P_{pack}	Aumenta	Aumenta
		Disminuye	Disminuye
Valor residual del Pack	$V_{resid_{pack}}$	Aumenta	Disminuye
		Disminuye	Aumenta
Costo Mantenimiento del Pack	$C_{MtnPack-t}$	Aumenta	Aumenta
		Disminuye	Disminuye
Costo del Riesgo sobre el Pack	$C_{RiskPack-t}$	Aumenta	Aumenta
		Disminuye	Disminuye
Vida útil (Primera Vida)	n	Aumenta	Aumenta
		Disminuye	Disminuye
Costo de Oportunidad	r	Aumenta	Disminuye
		Disminuye	Aumenta

Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, para un P_{pack} dado, el máximo $VP(Fee)$ se obtiene cuando el valor residual del pack y el costo de oportunidad son bajos; mientras que los costos de mantenimiento y de riesgo son altos, efecto que se intensifica con una mayor vida útil de la batería. El mínimo $VP(Fee)$ se alcanza bajo las condiciones opuestas.

A continuación, se observan los resultados de simular en diferentes escenarios, considerando el precio de los packs observados del U.S. Department of Energy (2023) y los proyectados hasta 2035 provenientes de BloombergNEF (2024).

Tabla 5. Precio del Pack de baterías por kWh

Año	Ppack (\$/kWh)
2011	\$ 1.079
2012	\$ 848
2013	\$ 780
2014	\$ 692
2015	\$ 448
2016	\$ 345
2017	\$ 258
2018	\$ 211
2019	\$ 183
2020	\$ 160
2021	\$ 150
2022	\$ 161
2023	\$ 139
2024	\$ 115
2025*	\$ 113
2026*	\$ 104
2027*	\$ 96
2028*	\$ 90
2029*	\$ 85
2030*	\$ 80
2031*	\$ 76
2032*	\$ 73
2033*	\$ 69
2034*	\$ 67
2035*	\$ 64

Fuente: Elaboración propia usando datos de BNEF (2024).

Adicionalmente, se sensibilizará el ejercicio con los siguientes valores:

- $V_{resid_{Pack}} \in [0\%; 30\% * P_{pack}]$
- $C_{MtnPack-t} \in [0\%; 5\% * P_{pack}]$
- $C_{RiskPack-t} \in [0\%; 10\% * P_{pack}]$
- $n \in [5; 12 \text{ años}]$
- $r \in [0\%; 25\%]$

Con las condiciones anteriores y usando un simulador de AI Studio de Google, es posible una aplicación que permita iterar y graficar los diferentes escenarios, incluyendo los mínimos y máximos posibles:

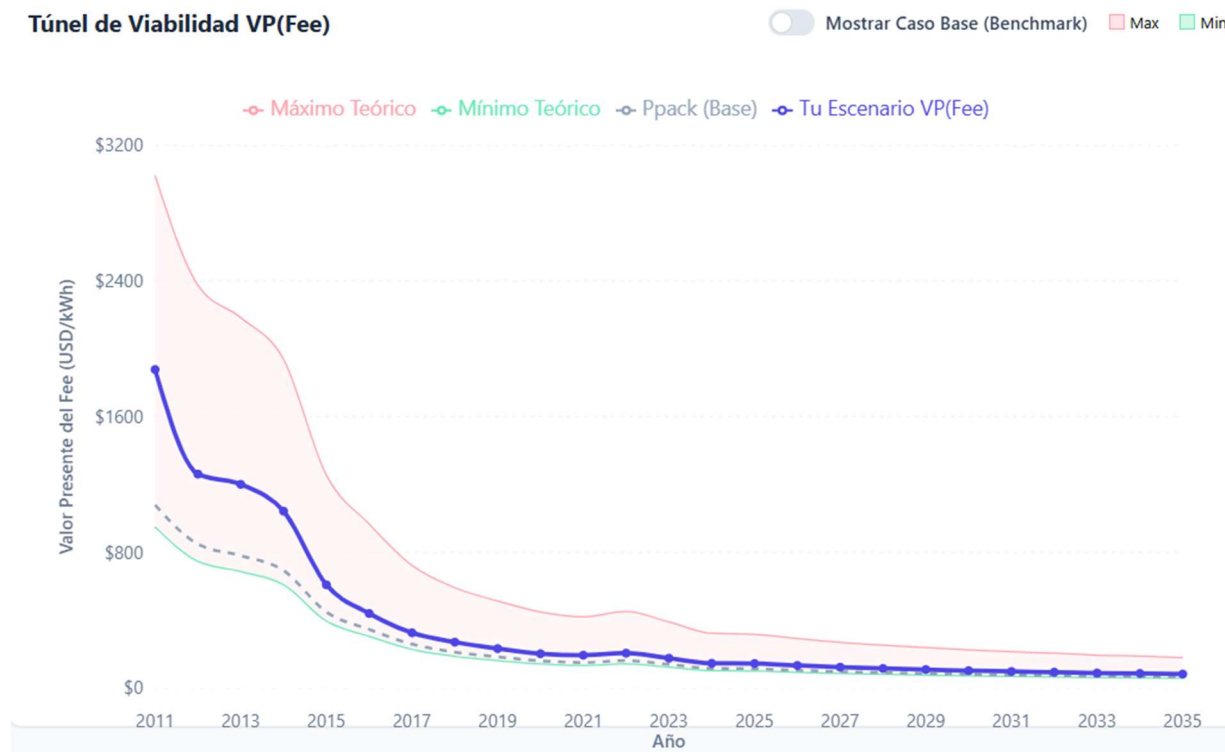


Ilustración 2. Túnel de Viabilidad para el Valor Presente del Fee (BaaS)
Fuente: Propia. Ver código fuente en los anexos.

El ejercicio de sensibilidad realizado, bajo rangos amplios y conservadores para el valor residual, los costos de mantenimiento, los costos de riesgo, la vida útil y la tasa de descuento, permite caracterizar un túnel de viabilidad económica para el valor presente del fee compatible con la indiferencia entre los esquemas BaaP y BaaS. En términos puramente teóricos, dicho túnel es amplio, lo que refleja que, bajo combinaciones extremas de supuestos, existe un espacio significativo para la servitización de la batería.

No obstante, el análisis conjunto de los resultados muestra que el precio observado y proyectado del pack de baterías —utilizado como referencia empírica— se ubica de forma sistemática mucho más cerca del límite inferior del túnel que de su límite superior. Este resultado no es casual, sino que responde a transformaciones estructurales en la tecnología y en la economía de las baterías de ion-litio.

En primer lugar, la rápida maduración tecnológica ha reducido de manera sustancial los costos

asociados al riesgo. Las tasas de reemplazo observadas convergen, desde mediados de la década de 2010, a niveles cercanos al 0,1–0,2 %, lo que disminuye drásticamente el valor económico de la transferencia de riesgo hacia el proveedor del servicio. En segundo lugar, los costos de mantenimiento del pack se han visto igualmente comprimidos, dado que las baterías modernas son, en la práctica, libres de mantenimiento durante gran parte de su primera vida, especialmente en aplicaciones automotrices.

En tercer lugar, y de manera particularmente relevante, el valor residual esperado del pack al final de su primera vida enfrenta una presión estructural a la baja. La caída acelerada del costo de las baterías nuevas reduce el precio de referencia de las baterías usadas, limitando el valor de reventa o reutilización implícito en el esquema BaaP. Este efecto erosiona uno de los componentes que, en principio, podría ampliar el espacio de viabilidad del fee.

Como resultado de estas dinámicas, el túnel de viabilidad tiende a converger hacia el precio de las baterías nuevas, más que hacia los costos teóricos de servitización. En otras palabras, el espacio económico que permitiría cobrar un fee elevado se contrae a medida que la tecnología se vuelve más barata, confiable y estandarizada.

Sin embargo, este resultado no debe interpretarse como estructuralmente inmutable. Los mercados de baterías permanecen expuestos a choques exógenos que pueden alterar temporal o permanentemente los parámetros clave del modelo. Entre ellos se incluyen: episodios de escasez de materias primas críticas, incrementos abruptos en las primas de riesgo derivados de fallas sistémicas o llamados a revisión por defectos de fabricación, así como cambios en la frecuencia o severidad de accidentes asociados a baterías. Cualquiera de estos factores podría ensanchar nuevamente el túnel de viabilidad y revalorizar, al menos transitoriamente, el esquema BaaS.

Fundamentación económica del TCO (BaaP vs BaaS):

Los resultados del Módulo A permiten establecer una conclusión económica central: a medida que el costo total esperado de la propiedad de la batería disminuye, el esquema Battery-as-a-Product (BaaP) tiende a volverse dominante desde la perspectiva del consumidor, reduciendo el espacio económico en el cual el esquema Battery-as-a-Service (BaaS) puede competir únicamente a través de la transferencia de riesgo y la servitización del activo.

Esta conclusión no solo tiene implicaciones para la estructura tarifaria y la viabilidad del modelo BaaS, sino que también altera de manera sustancial la dinámica de propiedad de los paquetes de baterías. En la medida en que los consumidores optan crecientemente por la compra directa del pack, el valor residual al final de la primera vida útil se internaliza, en lugar de ser capturado por un proveedor de servicios. Este cambio en la titularidad económica del activo constituye el principal vínculo entre el análisis de TCO y la disponibilidad futura de baterías para aplicaciones de segundo uso.

Desde una perspectiva agregada, la elección entre BaaP y BaaS condiciona el volumen, el momento y la distribución temporal del flujo de baterías que alcanzan el fin de su primera vida automotriz. Un entorno en el cual BaaP es dominante tiende a generar un mayor stock disperso de baterías disponibles para reutilización estacionaria, mientras que un esquema BaaS concentrado podría centralizar dicho flujo en manos de operadores especializados.

En este contexto, el análisis microeconómico desarrollado en el Módulo A resulta necesario pero no suficiente para evaluar las implicaciones sistémicas del mercado de baterías. Si bien el TCO permite identificar las condiciones bajo las cuales un consumidor individual prefiere BaaP o BaaS, no permite cuantificar el impacto agregado de estas decisiones sobre la oferta futura de baterías de segundo uso.

Por esta razón, el Módulo B extiende el análisis hacia un enfoque stock-flujo de carácter agregado, cuyo objetivo es estimar, a partir de la evolución del parque global de vehículos eléctricos, la magnitud y el ritmo de los flujos anuales de baterías que abandonan su primera vida y se vuelven potencialmente reutilizables. Este enfoque permite conectar las decisiones individuales modeladas en el TCO con la dinámica temporal del stock de baterías disponibles para aplicaciones estacionarias.

En síntesis, el Módulo A define el marco económico que determina quién captura el valor residual de la batería, mientras que el Módulo B cuantifica las consecuencias de esa captura sobre la disponibilidad futura de baterías de segundo uso. De este modo, ambos módulos se integran en una estructura analítica coherente que vincula decisiones microeconómicas de propiedad con resultados macroeconómicos en el mercado emergente de almacenamiento energético.

MÓDULO B: STOCK – FLUJO SLB

El objetivo del Módulo B es estimar, a partir de datos empíricos sobre la difusión global de vehículos eléctricos (EV), la magnitud del flujo anual de baterías que alcanzan el fin de su primera vida y son potencialmente reutilizables como baterías de segundo uso (SLB). Este módulo construye un modelo stock-flujo de carácter agregado que conecta el crecimiento del parque mundial de EV con la disponibilidad futura de capacidad de almacenamiento para aplicaciones estacionarias.

El tránsito de las baterías de vehículos eléctricos (EV) hacia una segunda vida (SLB, Second-Life Batteries) se describe mediante un modelo stock-flujo, en el cual los flujos de entrada corresponden a las nuevas ventas de EV y los flujos de salida se producen cuando la condición de salud (SoH) de los paquetes cae por debajo de un umbral operativo. De acuerdo con estándares industriales y evidencia empírica, este límite se sitúa entre 70 y 80 % de la capacidad nominal (Harper et al., 2019; Zakeri & Syri, 2015). Una vez alcanzado este punto, los módulos pueden retirarse del vehículo, diagnosticarse y clasificarse según su integridad electroquímica para determinar su destino: reutilización, remanufactura o reciclaje.

BloombergNEF (2024) proyecta que el rezago medio entre la primera y la segunda vida oscila entre 8 y 12 años, dependiendo del régimen de uso y de la química (NMC, LFP, NCA). Este rezago crea una cohorte temporal que permite modelar la oferta potencial de SLB como una función retardada de las ventas históricas de EV. Solo una fracción de estas baterías (estimada entre 40% y 60% en 2024) cumple los criterios técnicos y económicos para su reutilización; el resto se deriva a procesos de reciclaje metalúrgico o hidrometalúrgico (BloombergNEF, Energy Storage Market Outlook 1H 2025).

El State of Health (SoH) se consolida como el parámetro crítico que enlaza el ciclo de vida primario y secundario. Según Andreassen (2024), el SoH no sólo mide la capacidad residual, sino que resume la historia de degradación electroquímica y térmica del pack, determinando su valor residual y su aptitud para aplicaciones estacionarias de almacenamiento. Un SoH elevado reduce costos de reacondicionamiento y eleva el rendimiento del SLB, afectando directamente el costo nivelado de almacenamiento (LCOS) y la viabilidad económica de proyectos de segundo uso.

El marco stock-flujo permite estimar la evolución del inventario dinámico de baterías en el

sistema energético: las entradas de nuevas ventas incrementan el stock de primera vida, mientras que los retiros generan flujos hacia el pool de SLB y al reciclaje. Zhou (2025) subraya que esta dinámica define la estructura de la cadena de valor entre modelos Battery-as-a-Product (BaaP) y Battery-as-a-Service (BaaS), dado que los esquemas de servitización permiten internalizar el control del SoH y del flujo de retorno, optimizando la asignación intertemporal de baterías en función de su vida útil remanente.

Función del modelo Stock–Flujo

El modelo stock–flujo describe el paso del parque de baterías desde su primera vida en vehículos eléctricos (EV) hacia su segunda vida (SLB) o reciclaje. La lógica es análoga a la de los modelos de capital o población:

- ✓ El stock es la cantidad acumulada de baterías instaladas en los EV en uso.
- ✓ Los flujos son las nuevas baterías que ingresan (ventas de EV) y las que egresan (retiros por degradación del SoH).

Sea S_t el stock global de vehículos eléctricos en el año t (en millones de vehículos) y $V_{EV,t}$ las ventas anuales de EV en el mismo año. La ecuación de balance stock-flujo es:

$$S_t = S_{t-1} + V_{EV,t} - R_t$$

Donde:

S_t : *Stock de baterías instaladas en los EV en el periodo t*

S_{t-1} : *Stock de baterías del periodo anterior a t*

$V_{EV,t}$: *Ventas de vehículos eléctricos nuevos en el periodo t*

R_t : *Retiro de baterías por degradación del SoH en el periodo t*

Los retiros R_t dependen del tiempo de vida promedio y del perfil de degradación del SoH (State of Health). El SoH es la variable crítica que determina el momento en que una batería deja de ser funcional en un EV (generalmente cuando $\text{SoH} < 0.8$) y puede pasar a SLB o reciclaje. Aunque esto podría modelarse de manera simple como

$$R_t = \delta * S_{t-1}$$

donde δ es la tasa de salida equivalente (retiros/stock)

los retiros no se dan de manera uniforme en el tiempo ni tampoco suceden todos al mismo tiempo solo por cumplir exactamente los años pronosticados por los fabricantes. Para tener una mejor estimación de los retiros, no se usará el factor δ y en cambio se propone modelar el retiro incorporando una función de Weibull altamente usada para el cálculo de tasas de supervivencia en bienes durables:

$$R_t = \sum_{\tau=2010}^t V_{\tau} * f(a)$$

$$a = t - \tau$$

Con,

a: número de años de vida útil promedio

τ : año de fabricación del vehículo

f(a): probabilidad discreta de retiro de Weibull

F(a): función de distribución acumulada

$$f(a) = F_{(a)} - F_{(a-1)}$$

para $a \geq 1$ y f(a) positivo.

$$R_t = \sum_{\tau=2010}^t V_{\tau} * f(t - \tau)$$

Sea C_t el tamaño promedio en kWh de cada vehículo eléctrico. IRENA (2024) afirma que el tamaño promedio de baterías de EV se estima que se estabilice alrededor de 57 kWh; entonces, para este caso particular se contempla un $C_t = 57$ kWh por cada vehículo eléctrico vendido; por lo tanto los retiros en kWh pueden expresarse como:

$$R_{t,kWh} = \sum_{\tau=2}^t V_{\tau} * C_t * f(t - \tau)$$

$$R_{t,kW} = \sum_{\tau=2}^t V_{\tau} * 57 * f(t - \tau)$$

No todas las baterías retiradas son aptas para una segunda vida. La fracción de baterías retiradas que pasan a SLB se puede estimar como una porción de las baterías retiradas.

Sea γ el factor que representa al porcentaje de las baterías retiradas que cumplen con los

requisitos necesarios para transitar hacia SLB.

Por lo tanto el flujo de las baterías hacia una segunda podría escribirse como:

$$Flujo_SLB_{t,kWh} = \gamma * R_{t,kWh}$$

$$Flujo_SLB_{t,kWh} = \gamma * \sum_{\tau=2010}^t V_{\tau} * C_{\tau} * f(t - \tau)$$

De acuerdo con BloombergNEF (2025), $\gamma \in [40\%; 60\%]$; sin embargo, el número real de γ se verá afectado cada vez más por como se incline la balanza entre BaaS (γ_{BaaS}) y BaaP (γ_{BaaP}), ya que aunque en ambos escenarios puedan tener las mismas condiciones finales en sus baterías, es claro que el proveedor de BaaS dará una disposición mucho más rápida, estructurada y directa de las baterías hacia una segunda vida; mientras que en el escenarios de BaaP, el propietario hará una disposición final aleatoria que no garantiza ni trazabilidad ni certeza en su trasegar hacia una segunda vida.

Caso Particular:

Usando los datos de ventas de EV nuevos y el stock disponible según IEA (2025),

Tabla 6. Ventas de EV y BEV vs Stock, 2010–2024

Año	Ventas de EV + BEV (Millones de Vehículos)	EV + BEV Stock (Millones de Vehículos)
Año	V_t	S_t
2010	0,01	0,02
2011	0,04	0,06
2012	0,06	0,12
2013	0,11	0,22
2014	0,19	0,41
2015	0,32	0,72
2016	0,46	1,17
2017	0,75	1,93
2018	1,35	3,16
2019	1,50	4,65
2020	2,72	8,30
2021	5,77	14,01
2022	8,81	21,91
2023	11,51	33,93
2024	12,75	46,27

Fuente: Elaboración propia usando datos de IEA (2025).

Es posible calcular el retiro de vehículos usando los datos:

- Vida útil media (caso base): $\mu = 10$ años
- Weibull con forma $k = 3$ (Caso base)
- Escala λ calibrada para que el promedio sea 10 años

Se tiene que la media de la distribución Weibull es,

$$\mu = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Entonces

$$\lambda = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

$$\lambda = \frac{10}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{3}\right)}$$

$$\lambda = \frac{10}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{3}\right)}$$

$$\lambda = 11,2$$

La probabilidad discreta de retiro $f(a)$ equivale a

$$f(a) = F_a - F_{a-1}$$

Con $a \geq 1$, donde

$F(a)$ es la Distribución acumulada de Weibull.

Entonces los retiros anuales de EV pueden expresarse como:

$$R_t = \sum_{\tau=1}^A V_{t-\tau} * f(\tau)$$

Y en términos de kWh:

$$R_{kWh,t} = R_t * C_t = 57 * \sum_{\tau=1}^A V_{t-\tau} * f(\tau)$$

Y el Flujo-SLB en términos de kWh queda expresado como:

$$Flujo_SLB_{t,kWh} = \gamma * R_{kWh,t}$$

$$Flujo_SLB_{t,kWh} = \gamma * \sum_{\tau=2010}^t V_{\tau} * C_{\tau} * f(\tau)$$

Con $\gamma \in \{0,4; 0,5; 0,6\}$

Con todo esto es posible obtener los siguientes datos:

Tabla 7. Cálculo de SLB Potencia usando Weibull 2010 - 2023

Module B Weibull Output (2010-2024)									
	Year	V_t_million	S_t_obs_million	R_t_weibull_million	S_t_model_million	R_t_energy_million_kWh	SLB_potential_million_kWh_g0.4	SLB_potential_million_kWh_g0.5	SLB_potential_million_kWh_g0.6
1	2010	0.01	0.02	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2011	0.04	0.06	0.0	0.05	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002
3	2012	0.06	0.12	0.0001	0.1099	0.0045	0.0018	0.0022	0.0027
4	2013	0.11	0.22	0.0004	0.2195	0.0214	0.0086	0.0107	0.0128
5	2014	0.19	0.41	0.0012	0.4084	0.0665	0.0266	0.0332	0.0399
6	2015	0.32	0.72	0.0029	0.7255	0.1659	0.0663	0.0829	0.0995
7	2016	0.46	1.17	0.0064	1.1791	0.3631	0.1452	0.1816	0.2179
8	2017	0.75	1.93	0.0127	1.9164	0.726	0.2904	0.363	0.4356
9	2018	1.35	3.16	0.0237	3.2427	1.3513	0.5405	0.6756	0.8108
10	2019	1.5	4.65	0.042	4.7006	2.3952	0.9581	1.1976	1.4371
11	2020	2.72	8.3	0.0719	7.3487	4.1005	1.6402	2.0502	2.4603
12	2021	5.77	14.01	0.1186	13.0001	6.7623	2.7049	3.3812	4.0574
13	2022	8.81	21.91	0.1918	21.6182	10.9349	4.374	5.4675	6.5609
14	2023	11.51	33.93	0.3112	32.8171	17.7358	7.0943	8.8679	10.6415
15	2024	12.75	46.27	0.506	45.061	28.8433	11.5373	14.4217	17.306

Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente se obtiene:

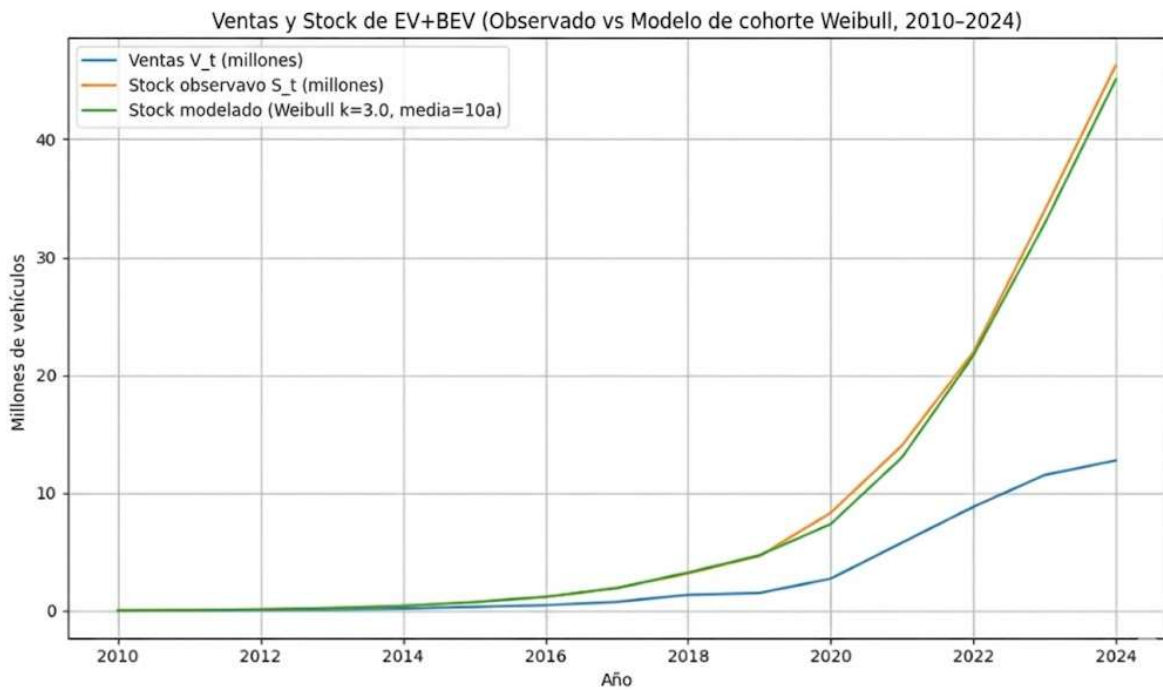


Ilustración 3. Stock y Ventas de EV 2010 – 2024

Fuente: Propia

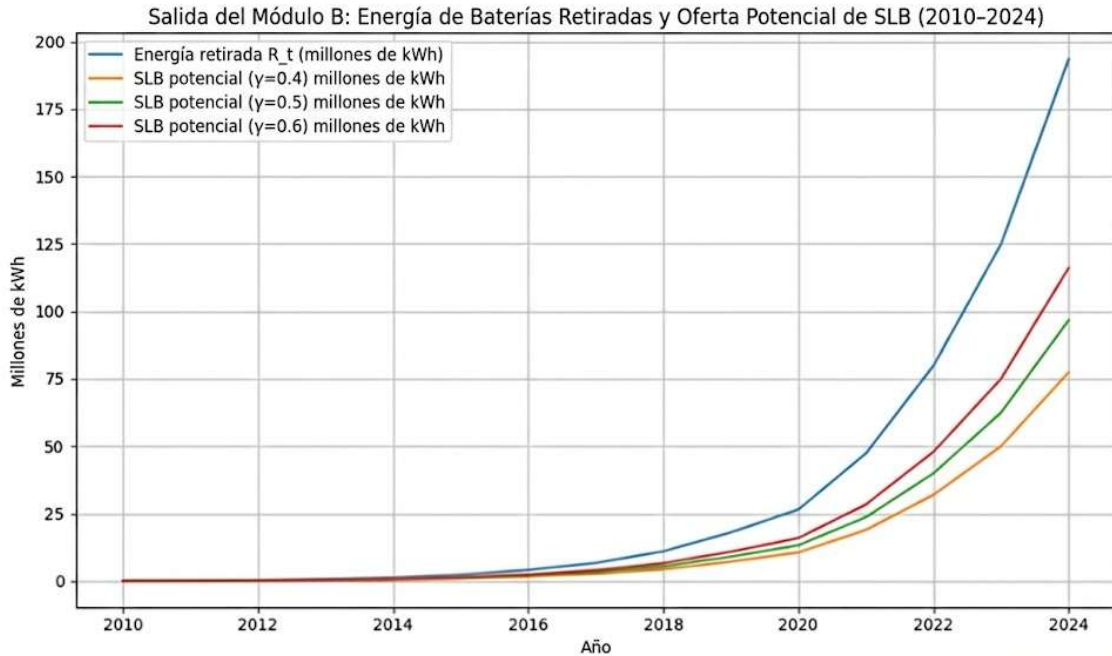


Ilustración 4. Retiros de EV y Potencial SLB 2010 – 2024

Fuente: Propia

El Modelo Stock-Flujo permite cuantificar la oferta potencial de baterías de segunda vida (SLB) a partir de la dinámica del parque global de vehículos eléctricos, incorporando rezagos tecnológicos y retiros no uniformes mediante una función Weibull. Los resultados muestran que, aunque el flujo anual de SLB crece de forma acelerada conforme aumenta el stock de EV, dicha oferta está físicamente restringida por la vida útil automotriz, el umbral de State of Health (SoH) y la fracción efectivamente reutilizable. En consecuencia, aun bajo escenarios favorables, el volumen proyectado de SLB no sería suficiente para cubrir la demanda esperada de capacidad de almacenamiento estacionario entre 2020 y 2035, lo cual implica que el mercado dependerá de una combinación de baterías nuevas y SLB para cerrar la brecha de capacidad. Esta situación establece una restricción estructural fundamental para el Módulo C: el costo nivelado del almacenamiento con SLB (LCOS-SLB) no solo depende de CAPEX/OPEX y degradación, sino también de la disponibilidad y calidad del flujo físico de baterías reutilizables. Por tanto, el análisis Estructura-Costo-Desempeño (E-C-D) del Módulo C deberá evaluar la competitividad de SLB bajo condiciones de oferta limitada, donde modelos como Battery-as-a-Service (BaaS) pueden reducir fricciones de recuperación, estandarización y reacondicionamiento, afectando directamente el LCOS-SLB y la escalabilidad del mercado.

MÓDULO C: LCOS-SLB Y ESTRUCTURA – COSTO - DESEMPEÑO (ECD)

El paradigma Estructura – Conducta – Desempeño (SCP por sus cifras en inglés) tradicionalmente asume que la estructura del mercado (concentración y número de competidores) determina la conducta que a su vez determina los resultados en términos de precios, eficiencia y rentabilidad. Sin embargo, en mercados como los de almacenamiento de energía, caracterizados por costos fijos alargados, ciclos tecnológicos profundos y alta incertidumbre, el modelo SCP resulta insuficiente.

La evolución hacia Estructura – Costo – Desempeño (ECD) responde a necesidades específicas:

- Incorporar el rol del aprendizaje tecnológico y las economías de escala en la formación de la estructura de mercado.
- Reconocer cómo las regulaciones y políticas públicas alteran costos de operación, inversión y riesgo, desplazando parte de la conducta hacia condicionantes institucionales.
- Ajustar la evaluación de desempeño para incluir no solo resultados económicos sino también sostenibilidad y confiabilidad técnica, factores críticos en energía renovable y almacenamiento (IRENA, 2020).

Adicionalmente, el modelo ECD permite una mayor flexibilidad para modelar estructuras industriales verticalmente integradas y modelos de negocio basados en servicios, que desafían los supuestos neoclásicos de mercados atomizados.

Relación entre Estructura, Costos y Desempeño en Sistemas de Almacenamiento

Estructura: Barreras de Entrada, Concentración y Verticalidad

El mercado de almacenamiento energético con baterías, tanto nuevas como de segunda vida, presenta barreras de entrada significativas derivadas de los altos costos hundidos en investigación, certificación y escalamiento industrial. La inversión inicial en mega-fábricas, laboratorios de diagnóstico y sistemas de gestión térmica y electrónica (BMS) representa un umbral elevado de capital que restringe la participación de nuevos actores (Sutton, 1991). Además, las normas de seguridad y repotenciación como la UL 1974 para el reacondicionamiento de baterías usadas, junto con la necesidad de trazabilidad y cumplimiento de estándares de transporte y almacenamiento (UN 38.3, ISO 12405), generan una capa adicional de complejidad técnica y regulatoria. Esta combinación de exigencias

técnicas y financieras hace que el acceso a insumos críticos (en particular, packs usados con historial verificado) se convierta en una ventaja competitiva clave y en un mecanismo de exclusión implícita para los nuevos entrantes (Harper et al., 2019).

En este contexto, la estructura de mercado tiende hacia la concentración, medida mediante índices como el Herfindahl–Hirschman Index (HHI) y la participación de los tres mayores fabricantes globales (CATL, LG Energy Solution y BYD), que en conjunto representaron cerca del 70 % de la capacidad de producción de baterías de ion-litio en 2024 (BloombergNEF, 2024). La concentración favorece economías de escala y de alcance, reduciendo los costos unitarios (USD/kWh) mediante aprendizaje industrial, integración de procesos y expansión de la cadena de valor (Baumol, Panzar & Willig, 1982). Sin embargo, esta concentración también implica riesgos de poder de mercado y de dependencia tecnológica, especialmente para regiones importadoras como América Latina, donde la mayoría de las celdas provienen de Asia y la capacidad de producción local sigue siendo marginal (BNEF, 2024). Así, la estructura concentrada contribuye a estabilizar la oferta global, pero puede restringir la competencia y ralentizar la diversificación de tecnologías y proveedores en los mercados emergentes.

Finalmente, la integración vertical se ha convertido en un rasgo dominante de la industria. Las empresas líderes han adoptado modelos que abarcan desde la extracción de minerales críticos hasta la recolección y reacondicionamiento de baterías para segunda vida, consolidando un control de extremo a extremo sobre la cadena de valor (Porter, 1980). Este tipo de integración permite capturar sinergias logísticas, reducir la incertidumbre sobre el suministro y facilitar la internalización de servicios bajo esquemas Battery-as-a-Service (BaaS). No obstante, la verticalidad también plantea retos de gobernanza y regulación, pues amplía la asimetría informativa entre fabricantes y usuarios, y puede limitar el acceso abierto a baterías usadas para segundo uso. En consecuencia, la estructura industrial del sector condiciona directamente los costos de producción, la dinámica de competencia y el potencial de expansión de los modelos BaaS y BaaP basados en baterías de segunda vida (BloombergNEF, 2024).

Costos: Composición y Variables Estratégicas

Los costos en almacenamiento incluyen un componente fijo elevado (I+D, planta, infraestructura) y costos variables vinculados a mantenimiento, logística y reemplazo de componentes (BNEF, 2024). Particularmente relevante es el costo nivelado de

almacenamiento (LCOS, por sus siglas en inglés), una métrica sintetizadora que integra todos los costos a lo largo del ciclo de vida y su degradación funcional (Schmidt et al., 2019). Controlar estos costos es fundamental para asegurar competitividad, reducir precios al consumidor y viabilizar operaciones de segundo uso o reciclaje.

El costo nivelado de almacenamiento (LCOS) es una herramienta analítica que permite comparar la eficiencia económica de distintos sistemas de almacenamiento eléctrico, considerando los flujos de costos e ingresos a lo largo de su vida útil. Conceptualmente, representa el costo promedio por cada unidad de energía entregada, expresado en USD/kWh, y su propósito es homogeneizar los diferentes componentes de gasto (inversión inicial, costos operativos, reemplazos, y degradación) bajo una tasa de descuento constante (IRENA, 2022). Este indicador permite comparar tecnologías y modelos de negocio, especialmente en contextos donde las baterías de segunda vida (SLB) pueden ofrecer menores costos de capital inicial y mayor flexibilidad en la provisión de servicios energéticos (BloombergNEF, 2025).

La expresión general del LCOS puede representarse como:

$$LCOS = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_{Capex,t} + C_{Opex,t} + C_{Rep,t} - SV}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

LCOS: Costo Nivelado del Almacenamiento de energía

C_{Capex}: Costo de Inversión (Capital Expenditures – CAPEX)

C_{Opex}: Costo de Operación y Mantenimiento (Operational Expenditures – OPEX)

C_{Rep,t}: Costo de Reposición (reemplazo) en el tiempo *t*

E_t: Energía Útil Descargada en el tiempo *t*

r: Tasa de descuento (Schmidt et al., 2019; IRENA, 2020).

SV: Costo de Salvamento.

En el contexto del paradigma de Estructura-Conducta-Desempeño (ECD), el LCOS adquiere un valor estratégico al conectar las decisiones técnicas de diseño y los costos estructurales

con el desempeño competitivo de las empresas en el mercado de almacenamiento. Las empresas que adoptan modelos de Battery as a Service (BaaS) tienden a optimizar el LCOS mediante economías de escala y contratos flexibles de servicio, mientras que las que operan bajo Battery as a Product (BaaP) dependen de la reducción directa de CAPEX y la durabilidad de los activos. En ambos casos, el LCOS se convierte en un puente cuantitativo que traduce las variables estructurales de costo en desempeño de mercado, explicando cómo las innovaciones en reutilización y reciclaje impactan la sostenibilidad y la competitividad del sector (Schmidt et al., 2019; BloombergNEF, 2025).

De acuerdo con el 1H 2025 Energy Storage Market Outlook (BloombergNEF, 2025), los costos de almacenamiento para sistemas nuevos de baterías de ion-litio se ubican entre 0,18 y 0,25 USD/kWh, mientras que los proyectos basados en SLB logran reducirlos hasta 0,12–0,16 USD/kWh, dependiendo de la degradación y del costo de integración (balance of system - BOS). Esta diferencia se explica principalmente por la reutilización de celdas con 70–80 % de capacidad residual y menores costos de adquisición. En consecuencia, los modelos BaaS que operan con SLB obtienen ventajas adicionales al distribuir los costos de capital en un portafolio de usuarios y ciclos, lo que mejora la rentabilidad ajustada al riesgo y permite a los operadores mantener precios competitivos en servicios de almacenamiento distribuido (IRENA, 2022; BloombergNEF, 2025).

En síntesis, el modelo de costos basado en LCOS no solo cuantifica la eficiencia económica de las tecnologías de almacenamiento, sino que también actúa como un indicador integral de sostenibilidad y estrategia empresarial dentro del marco ECD. Su aplicación en el análisis de baterías como servicio y como producto permite capturar las diferencias estructurales en la asignación de riesgos, la formación de precios y la innovación en la cadena de valor de las SLB. En ese sentido, el LCOS se convierte en una herramienta esencial para proyectar la competitividad futura del almacenamiento en América Latina y su papel en la transición energética (IRENA, 2022; Luo et al., 2015; Schmidt et al., 2019; BloombergNEF, 2025).

Acotando esa ecuación de LCOS al ámbito de SLB, se tiene que:

$$LCOS_{SLB} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{C_{Capex,SLB} + C_{Opex,SLB} + C_{Rep,t} - SV}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

- $LCOS_{SLB}$: Costo Nivelado del Almacenamiento de energía en SLB
- $C_{capex,SLB}$: Costo de Inversión en SLB
- $C_{opex,SLB}$: Costo de Operación y Mantenimiento en SLB
- E_t : Costo de la Energía Útil Descargada en el tiempo t en SLB
- T : Vida remanente esperada de SLB.
- r : Tasa de descuento (Schmidt et al., 2019; IRENA, 2020).

Aunque $LCOS_{SLB}$ tiene la misma estructura de costos que LCOS, los montos y frecuencias son diferentes. El $LCOS_{SLB}$ está acotado inferiormente por la disponibilidad física de baterías reutilizables estimada en el Módulo B. Aun cuando la demanda de almacenamiento crezca, el costo marginal de SLB no puede disminuir si el flujo SLB_t es limitado o altamente heterogéneo; de ahí la importancia de esquemas BaaS.

En esquemas BaaS, la estructura de mercado se caracteriza por integración vertical, control del activo y estandarización técnica, lo que reduce costos de diagnóstico, logística y reacondicionamiento de baterías SLB. En contraste, el modelo BaaP presenta una estructura fragmentada que incrementa costos de transacción y eleva el LCOS-SLB, incluso cuando el CAPEX de las celdas es similar.

Estas diferencias estructurales se traducen en desempeños divergentes: bajo BaaS, el LCOS-SLB converge más rápidamente hacia niveles competitivos frente a baterías nuevas, mientras que bajo BaaP la dispersión del stock y la falta de trazabilidad imponen un piso de costos más alto, limitando la escalabilidad del mercado de segunda vida.

Para modelar LCOS vs LCOS-LSB se usará una aplicación construida en AI Studio de Google (se anexa código fuente) con la finalidad de comparar diferentes escenarios de sensibilidad. Para esta simulación se usará la metodología para sistemas de almacenamiento de energía a escala de utility de acuerdo con Steckel, Kendall & Ambrose (2021).

Se usarán los siguientes datos de entrada:

Tabla 8. Parámetros y escenarios para cálculo de LCOS y LCOS-SLB

Parámetros Globales

Horizonte del Proyecto	15 años
Tasa de Descuento	8%
Tamaño del Sistema de Almacenamiento	10 MW
Ciclos por año	365

Escenario 1: Con Baterías Nuevas

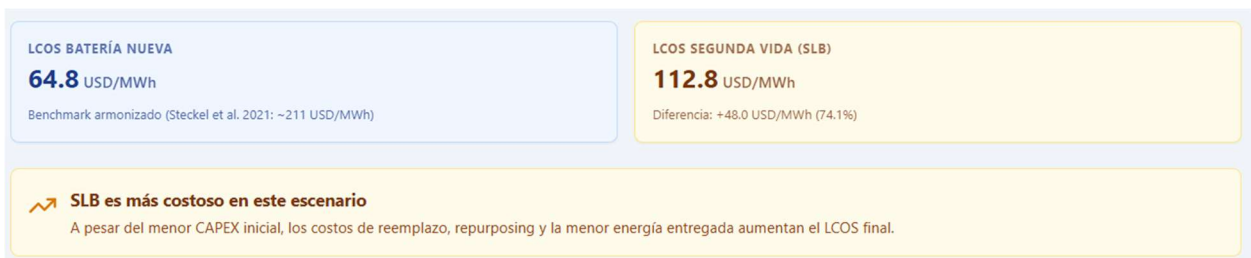
Capex inicial (USD/kWh)	\$ 112
Vida útil de baterías	15 años
Degradación Anual (%)	2%
Opex por año (\$/kWh)	\$ 6
Profundidad de Descarga - DoD (%)	90%

Escenario 2: Con Baterías Segunda Vida

Capex de Módulos (USD/kWh) (50% del costo de nueva)	\$ 56
Costo de Reacondicionamiento por kWh	\$ 40
Vida útil de baterías	8 años
Costo de Reemplazo por kWh	\$ 112
Degradación Anual (%)	4%
Opex por año (\$/kWh)	\$ 9
Profundidad de Descarga - DoD (%)	90%

Fuente: Elaboración propia.

Al simular los datos anteriores con las ecuaciones de LCOS y LCOS.SLB se encuentra como resultado:





*Ilustración 5. Simulación LCOS vs LCOS-SLB
Fuente: Propia*

El LCOS-SLB resulta menos competitivo que el LCOS del sistema con baterías nuevas debido a los costos de reemplazo anticipados en el tiempo y a costos de operación y mantenimiento menos eficiente de las SLB (menor profundidad de descarga, mayor degradación anual y opex más elevado).

Adicional a las limitaciones por costos (LCOS) es necesario enfatizar que la disponibilidad de SLB para aplicaciones de almacenamiento estacionario está naturalmente limitado a la disponibilidad de Stock que se analizó en el módulo B y dicho stock se ve mucho más reducido cuando predominan los modelos de BaaP. Esta restricción física de la oferta de baterías para SLB limita y dificulta la escalabilidad que podría ayudar a mejorar los costos de mantenimiento y operación de estas.

Desempeño: Eficiencia Técnica y Económica

En el marco Estructura–Costo–Desempeño (E-C-D), el desempeño del almacenamiento con baterías de segunda vida (Second-Life Batteries, SLB) se entiende como el resultado observable de dos capas previas: (i) una estructura de mercado y de cadena (trazabilidad, estandarización, acceso a packs retirados, capacidad de repurposing) y (ii) una función de costos que integra CAPEX, OPEX, degradación y riesgo. En consecuencia, el desempeño relevante para esta tesis se mide principalmente por su competitividad económica y operativa, resumida en métricas comparables entre alternativas de almacenamiento, en particular el costo nivelado de almacenamiento (LCOS) y su versión con SLB (LCOS-SLB).

Desde el punto de vista técnico, el desempeño de un sistema SLB depende de la energía útil entregada durante su vida remanente, determinada por la eficiencia, la degradación y la confiabilidad del pack. En comparación con baterías nuevas, las SLB suelen tener menor vida

útil remanente, lo que puede reducir ciclos efectivos y aumentar la probabilidad de reemplazos; sin embargo, este menor desempeño técnico puede ser compensado por un menor costo de adquisición, lo que hace indispensable evaluar el trade-off a través de LCOS-SLB (Zakeri & Syri, 2015; Schmidt et al., 2019). En términos económicos, el desempeño se expresa en el costo por unidad de energía entregada, donde LCOS integra CAPEX, OPEX, eficiencia y degradación, permitiendo comparar de forma consistente proyectos con baterías nuevas versus SLB (Schmidt et al., 2019).

Finalmente, desde la lógica E-C-D, la mejora del desempeño no depende solo del hardware, sino de arreglos institucionales y organizacionales que reduzcan costos y riesgos: trazabilidad del estado de salud (SoH), estandarización de pruebas y protocolos de reacondicionamiento, y gestión responsable del ciclo de vida. Estas condiciones aumentan la calidad del stock reutilizable y reducen costos de diagnóstico y fallas, elevando la energía útil entregada y disminuyendo el LCOS-SLB, lo que resulta especialmente relevante para la escalabilidad del mercado de SLB en América Latina (Harper et al., 2019; European Commission, 2023).

Modelos BaaS y BaaP: Impactos Estructurales y Competitivos

Batería como Producto (BaaP)

- El consumidor adquiere la batería como bien duradero, reteniendo propiedad y riesgos.
- El mercado secundario de baterías usadas tiende a ser heterogéneo y fragmentado, con bajos niveles de estandarización técnica y contractual.
- La dispersión de propiedad dificulta el seguimiento y la trazabilidad, generando incertidumbre y costos elevados para la recolección y reacondicionamiento, limitando la viabilidad económica de baterías de segunda vida.
- Los incentivos a reciclaje y reutilización dependen en gran medida de regulaciones externas, programas de responsabilidad extendida y reciclamiento voluntario (Andreassen, 2024).

Batería como Servicio (BaaS)

- El fabricante o proveedor mantiene la propiedad y el control del activo.
- Modelos contractuales facilitados por plataformas digitales permiten gestionar el ciclo completo (uso, mantenimiento, reemplazo).

- Las economías de escala se alcanzan más rápidamente gracias a la integración vertical, la optimización logística y el mantenimiento predictivo.
- La estandarización y control de calidad facilitan la reintroducción eficiente de baterías en mercados de segunda vida, al reducir riesgos técnicos y costos operativos.
- Desde la perspectiva estructural, BaaS genera mercados con menor número de actores, mayor concentración y relaciones contractuales estables, que a su vez favorecen innovación y desarrollo tecnológico.

Efectos del Paradigma ECD en la Disponibilidad y Economía de Baterías de Segunda Vida (SLB)

El paradigma Estructura–Costo–Desempeño (ECD) ofrece un marco analítico para comprender cómo las características estructurales del mercado de almacenamiento, como la integración vertical, la concentración y la estandarización, inciden directamente sobre la disponibilidad, los costos y el desempeño de las baterías de segunda vida (SLB). En los modelos Battery-as-a-Service (BaaS), la integración vertical entre fabricantes, operadores y gestores de fin de vida permite conformar cadenas de valor robustas, con flujos de información trazables y un suministro consistente de packs usados aptos para su reacondicionamiento o reciclaje (BloombergNEF, 2024). Este control integral del ciclo de vida reduce pérdidas logísticas y mejora la calidad del material recuperado. Por el contrario, en el esquema Battery-as-a-Product (BaaP), la propiedad distribuida entre múltiples usuarios genera un stock fragmentado y heterogéneo, con variaciones significativas en el estado de salud (SoH), historial de uso y certificación, lo que eleva los costos de verificación y limita la conformación de mercados secundarios eficientes (Harper et al., 2019).

Desde la perspectiva de costos y desempeño, el modelo BaaS presenta ventajas estructurales al concentrar operaciones de diagnóstico y reacondicionamiento bajo sistemas digitales de gestión predictiva. La disponibilidad de datos centralizados sobre degradación, temperatura y ciclos permite realizar mantenimiento preventivo y reducir costos de pruebas, transporte y reprocesamiento (Visnjic, Wiengarten & Neely, 2022). Estas eficiencias se traducen en un menor costo nivelado de almacenamiento (LCOS-SLB), especialmente cuando las economías de escala y la agregación de flujos de baterías se combinan con procesos de automatización

industrial (Zakeri & Syri, 2015; Schmidt et al., 2019). En cambio, el modelo BaaP tiende a enfrentar costos marginales más altos debido a la dispersión de actores, la ausencia de interoperabilidad en diagnósticos y la necesidad de pruebas individualizadas, factores que dificultan alcanzar estándares homogéneos de desempeño. Esta fragmentación técnica aumenta la incertidumbre sobre la fiabilidad y eleva los riesgos asociados a fallos en la operación de SLB reacondicionadas (Andreassen & Lind, 2024).

En el plano de las externalidades y políticas públicas, los modelos BaaS tienden a internalizar mejor los impactos ambientales y tecnológicos, dado que las empresas mantienen responsabilidad extendida sobre todo el ciclo de vida de la batería y pueden implementar estrategias de circularidad en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7, 9, 12 y 13) (United Nations, 2023). Al centralizar la recolección y el reacondicionamiento, se minimizan residuos peligrosos y se optimiza el uso de materiales críticos como el litio, el níquel y el cobalto (BNEF, 2024). En contraste, el modelo BaaP requiere intervención regulatoria más intensa (a través de normas de retorno obligatorio, subsidios a la reutilización y estándares técnicos mínimos como UL 1974 o el battery passport europeo) para compensar fallas de mercado asociadas a la falta de trazabilidad y coordinación (European Commission, 2023). Por tanto, el paradigma ECD demuestra que las diferencias estructurales entre BaaS y BaaP se traducen en trayectorias divergentes de costo y desempeño, donde la integración y la gestión centralizada favorecen mayor eficiencia técnica, rentabilidad económica y sostenibilidad ambiental en el segmento de baterías de segunda vida.

Tabla 9. Cuadro Comparativo entre BaaS y BaaP

Componente ECD	BaaS (Batería como Servicio)	BaaP (Batería como Producto)
Estructura	Mercado concentrado, alta integración vertical, control de ciclo de vida	Mercado fragmentado, propiedad dispersa, trazabilidad limitada
Costos	Optimización logística, mantenimiento predictivo, menor costo transaccional	Altos costos de testing individual y logística dispersa, mayores costos de reacondicionamiento
Desempeño	Alta confiabilidad, estandarización técnica, gestión eficiente del valor residual	Rendimiento heterogéneo, riesgo técnico elevado, menor vida útil remanente
Efecto en SLB	Flujo constante y gestionado de baterías usadas, integración en circuito de reciclaje	Oferta irregular, recolección voluntaria y heterogénea, depende de incentivos regulatorios
Innovación	Mayor capacidad para innovación tecnológica y modelos circulares gracias a control activo	Limitada innovación, modelos tradicionales y menor adaptación a sostenibilidad

Fuente: Elaboración propia.

Implicaciones para el Mercado, Política y Sostenibilidad

En el ámbito de mercado, el modelo *Battery-as-a-Service* (BaaS) tiende a favorecer la consolidación de actores con alta capacidad de inversión tecnológica y financiera, lo que facilita la integración vertical, la estandarización de procesos y la optimización del ciclo de vida de las baterías (Visnjic, Wiengarten, & Neely, 2022). Esta estructura promueve economías de escala y permite mantener la trazabilidad de los activos, mejorando la eficiencia operativa y el desempeño ambiental del sistema (BloombergNEF, 2024). En contraste, el esquema *Battery-as-a-Product* (BaaP) preserva una mayor pluralidad de agentes y diversidad de oferta, pero enfrenta limitaciones estructurales para escalar modelos de reutilización y garantizar la homogeneidad técnica del stock de baterías usadas. La fragmentación de la propiedad y la ausencia de sistemas de gestión centralizada incrementan los costos transaccionales y reducen la eficiencia del mercado de segunda vida (Harper et al., 2019).

Desde la perspectiva de política pública, el diseño de marcos regulatorios diferenciados resulta esencial para corregir fallas de mercado y fomentar la transición hacia modelos más circulares. En el caso de BaaS, las políticas pueden enfocarse en incentivar la inversión en reacondicionamiento y trazabilidad digital, fortaleciendo los sistemas de información sobre estado de salud (SoH) y la interoperabilidad de baterías (European Commission, 2023). Por su parte, el modelo BaaP requiere instrumentos regulatorios compensatorios, como la responsabilidad extendida del productor (REP), estándares de recolección obligatoria, subsidios al reciclaje y esquemas de certificación técnica (UL 1974, IEC 62933), que garanticen la trazabilidad y el retorno seguro de las baterías fuera de servicio (IFC, 2021). Estas herramientas permiten equilibrar la competencia entre modelos y asegurar que las baterías descartadas se reincorporen a la cadena de valor bajo principios de circularidad y transparencia.

En términos de sostenibilidad, el modelo BaaS muestra una mayor capacidad para internalizar los costos ambientales y sociales asociados al uso y disposición de baterías. Al mantener la propiedad y gestión del activo durante todo su ciclo de vida, las empresas pueden aplicar estrategias de reacondicionamiento, reciclaje y compensación de carbono de manera más eficiente (Zhou, Pang, & Tang, 2025). Este enfoque contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7, 9, 12 y 13), promoviendo una economía más circular y baja en carbono (United Nations, 2023). En cambio, el modelo BaaP depende de la voluntad del usuario final y de la existencia de infraestructuras públicas o incentivos privados que aseguren la disposición adecuada del activo, lo que incrementa el riesgo de residuos mal gestionados y

pérdida de materiales críticos. En consecuencia, la evolución del mercado y de la política energética deberá orientarse hacia mecanismos híbridos que combinen la flexibilidad del BaaP con la eficiencia estructural y ambiental del BaaS, consolidando un marco sostenible de almacenamiento y reutilización de baterías en América Latina.

En síntesis, el Módulo C demuestra que la viabilidad económica de las baterías de segunda vida no depende únicamente de la caída exógena de los precios de las celdas, sino de la estructura contractual e industrial que gobierna el flujo de retorno de baterías desde la electromovilidad hacia el almacenamiento estacionario. El enfoque Estructura–Costo–Desempeño permite identificar que los esquemas BaaS generan condiciones estructurales favorables para reducir el LCOS-SLB y acelerar la adopción de SLB.

MÓDULO D: JUEGO ESTRATÉGICO (F, G, U)

Los resultados obtenidos en los Módulos A–B–C muestran que la dinámica competitiva entre Battery-as-a-Product (BaaP) y Battery-as-a-Service (BaaS) no depende únicamente del costo de la celda o del CAPEX inicial, sino de un conjunto de restricciones y externalidades que afectan el desempeño del sistema en el tiempo. En particular, el Módulo A sugiere que, a medida que disminuye el precio del pack nuevo, la opción de compra (BaaP) se vuelve relativamente más atractiva para el usuario final, desplazando la demanda hacia la propiedad del activo (Bulow, 1982; Waldman, 2003). En paralelo, el Módulo B evidencia que el flujo de baterías disponibles para segunda vida (SLB) se encuentra limitado por rezagos técnicos (vida útil automotriz, degradación y distribución de retiros), lo cual restringe la capacidad del mercado de SLB para cubrir la demanda de almacenamiento estacionario en el horizonte 2020–2035. Finalmente, el Módulo C muestra que, aun cuando el CAPEX inicial de SLB sea menor, el LCOS-SLB puede ser superior al LCOS con baterías nuevas debido a costos de reacondicionamiento, reemplazos anticipados y menor energía útil entregada en el ciclo de vida.

Bajo este contexto, el Módulo D tiene como objetivo formalizar un marco mínimo de teoría de juegos que permita explicar por qué, en ausencia de intervención estatal, el equilibrio competitivo tendería a favorecer el modelo BaaP en el corto y largo plazo, y por qué la entrada del jugador Gobierno (G) mediante políticas públicas puede desplazar el equilibrio hacia BaaS y SLB, habilitando condiciones de economía circular. Para ello, se plantea un juego estratégico con tres actores: Fabricante (F), Usuario (U) y Gobierno (G), en línea con la lógica estándar de interacción estratégica y equilibrios de Nash (Gibbons, 1992).

Se define un juego estático de información completa con tres jugadores $\{F, U, G\}$, en el cual cada uno elige una estrategia de manera simultánea.

Jugadores

- Fabricante (F): actor que diseña y ofrece el modelo de negocio predominante en el mercado (BaaS o BaaP), incluyendo el diseño contractual, logística y gestión del ciclo de vida.
- Usuario (U): consumidor final que decide entre adoptar un esquema de servicio o adquirir la batería como activo propio.

- Gobierno (G): regulador institucional que puede intervenir mediante instrumentos de política pública orientados a economía circular, trazabilidad y reducción de fallas de mercado.

Estrategias

Cada jugador tiene dos estrategias posibles:

- Fabricante F: $S_f \in \{B,P\}$
 - donde B representa ofrecer BaaS y P representa ofrecer BaaP.
- Usuario U: $S_u \in \{A,O\}$
 - donde A representa adoptar BaaS (cuando está disponible) y O representa comprar/poseer la batería bajo BaaP.
- Gobierno G: $S_g \in \{I,N\}$
 - Donde I representa intervención (políticas pro-circularidad y SLB) y N representa no intervención.

Esta estructura del juego es útil porque permite representar el conflicto central identificado: BaaP tiende a ser eficiente desde la perspectiva privada del usuario cuando el precio de packs nuevos cae (Módulo A), mientras que BaaS genera beneficios sociales y de eficiencia dinámica al facilitar trazabilidad, reacondicionamiento y retorno hacia SLB (Módulos B y C).

Supuestos Económicos

1. Supuesto 1

Cuando el costo del pack nuevo disminuye, el usuario percibe que la compra (BaaP) es relativamente más atractiva frente al pago periódico por servicio, debido a la reducción del costo de adquisición y a la posibilidad de apropiarse del valor residual del activo. Esta intuición es consistente con la literatura sobre bienes duraderos y la dinámica de precios intertemporales (Bulow, 1982; Waldman, 2003).

2. Supuesto 2

Bajo BaaP, la propiedad distribuida del activo induce fragmentación y

heterogeneidad del stock de baterías usadas, dificultando la trazabilidad, el reacondicionamiento y la canalización hacia SLB. En contraste, BaaS facilita coordinación y control del ciclo de vida, mejorando la calidad del flujo de retorno hacia segunda vida (Harper et al., 2019).

3. Supuesto 3

La oferta efectiva de SLB está limitada por rezagos de retiro y por la fracción reutilizable, lo que impide que el mercado de SLB cubra completamente la demanda de almacenamiento estacionario. Por tanto, el desempeño del sector depende de mecanismos que aumenten la eficiencia de recuperación y reduzcan costos de transacción (Módulo B).

4. Supuesto 4

El costo nivelado del almacenamiento es una métrica adecuada para evaluar competitividad tecnológica y de modelo de negocio, ya que integra CAPEX, OPEX, reemplazos y energía útil entregada. En particular, SLB no garantiza menor LCOS en ausencia de escala, estandarización y reducción de costos de reacondicionamiento y reemplazo (Schmidt et al., 2019; Steckel et al., 2021).

5. Supuesto 5

El gobierno puede alterar el equilibrio mediante instrumentos que cambian costos relativos y corrigen fallas de mercado (externalidades, coordinación y asimetrías de información). Entre dichos instrumentos se incluyen estándares técnicos, trazabilidad y esquemas de responsabilidad extendida del productor, alineados con tendencias regulatorias recientes como el Battery Passport en Europa (European Commission, 2023).

Equilibrios bajo dos escenarios institucionales

En lugar de construir una matriz tridimensional completa ($2 \times 2 \times 2$), se analiza el equilibrio en dos escenarios relevantes: sin intervención y con intervención, siguiendo un enfoque de equilibrio comparado institucional.

Escenario 1: Gobierno no interviene (Sg=N)

Bajo no intervención, el usuario elige la estrategia que minimiza su costo privado y maximiza

su flexibilidad. Dado el descenso del precio de packs nuevos y la preferencia por propiedad del activo, el usuario tiende a elegir: $S_u=O$

En respuesta, el fabricante tiene incentivos a ofrecer el modelo de negocio con mayor adopción y menor fricción de implementación inmediata: $S_f = P$

Por lo tanto, el resultado más probable es:

$$(S_f, S_u, S_g) = (P, O, N)$$

Este perfil estratégico constituye un equilibrio de Nash cualitativo: ningún jugador tiene incentivos a desviarse unilateralmente dado que el gobierno no altera los costos relativos y el usuario favorece la propiedad (Gibbons, 1992). Sin embargo, este equilibrio presenta una ineficiencia desde la perspectiva social, ya que BaaS tiende a fragmentar el flujo de retorno y reduce la capacidad de desarrollar un mercado eficiente de SLB (Harper et al., 2019).

Escenario 2: Gobierno interviene ($S_g=I$)

Bajo intervención, el gobierno aplica instrumentos que desplazan incentivos hacia economía circular y mejoran la trazabilidad del activo. Estos instrumentos pueden incluir:

- (i) estándares mínimos de reacondicionamiento y seguridad;
- (ii) trazabilidad digital (p. ej., battery passport);
- (iii) incentivos a infraestructura de repurposing;
- (iv) reglas de responsabilidad extendida del productor; y
- (v) señales de demanda (subastas o compras públicas con criterios de circularidad) (European Commission, 2023).

Esta intervención modifica el juego de dos formas:

- reduce costos efectivos y riesgos asociados a BaaS/SLB (menores fricciones y mayor certidumbre);
- eleva el costo relativo de BaaS al internalizar externalidades de disposición final y trazabilidad.

En consecuencia, la mejor respuesta del fabricante se desplaza hacia ofrecer BaaS: $S_f = B$ y la del usuario hacia adoptar el esquema de servicio: $S_u = A$; resultando en:

$$(S_f, S_u, S_g) = (B, A, I)$$

Este equilibrio institucionalmente inducido es consistente con la idea de que la política pública puede corregir fallas de coordinación y permitir que un equilibrio socialmente preferible emerja, habilitando economías de escala, estandarización y reducción del LCOS-SLB (Schmidt et al., 2019; Steckel et al., 2021)

A modo de ejemplificar numéricamente, se propone el siguiente ejercicio:

Se proponen criterios TCO, Stock y LCOS para ser valorados de la siguiente manera:

- +2, cuando existe un incentivo mayor para producir o consumir
- +1, cuando existe un incentivo para producir o consumir
- 0, cuando no existe incentivo para producir o consumir

En ausencia de intervención del gobierno (G=N)

Desde el punto de vista de TCO:

- El fabricante tiene un incentivo para ofrecer BaaS, por ello se le otorga +1
- El fabricante tiene un incentivo mayor para ofrecer BaaP, por ello se le otorga +2
- El usuario no tiene un incentivo para adoptar BaaS, por ello se le otorga 0
- El usuario tiene un incentivo mayor para comprar BaaP, por ello se le otorga +2

Desde el punto de vista de Stock:

- El fabricante no tiene un incentivo para ofrecer BaaS, por ello se le otorga 0
- El fabricante tiene un incentivo mayor para ofrecer BaaP, por ello se le otorga +2
- El usuario no tiene un incentivo para adoptar BaaS, por ello se le otorga 0
- El usuario tiene un incentivo para comprar BaaP, por ello se le otorga +1

Desde el punto de vista de LCOS:

- El fabricante no tiene un incentivo para ofrecer BaaS, por ello se le otorga 0
- El fabricante tiene incentivo mayor para ofrecer BaaP, por ello se le otorga +2
- El usuario no tiene un incentivo para adoptar BaaS, por ello se le otorga 0
- El usuario tiene un incentivo mayor para comprar BaaP, por ello se le otorga +2

Todos esos escenarios son bajo el supuesto que los deseos de los fabricantes y los

usuarios coinciden al elegir BaaS o BaaP; sin embargo, existen los posibles escenarios donde las preferencias son diferentes.

En los casos en los cuales los fabricantes eligen no ofrecer BaaS y los usuarios tienen preferencias por ese tipo de contratos, ambos sufren la consecuencia restando un poco de dinámica al mercado. Se define match como el estado en el que la modalidad ofrecida por F coincide con la preferencia revelada de U; mismatch ocurre cuando F ofrece una modalidad y U prefiere la otra. En este caso, ambos enfrentan costos de descoordinación que reducen su pago.

En ausencia de intervención del gobierno ($G=N$), pero tanto fabricantes como usuarios eligen opciones diferentes:

Desde el punto de vista de TCO, Stock y LCOS:

- El fabricante ofrece BaaS; pero el usuario tiene un incentivo mayor por comprar BaaP debido a su bajo costo relativo, lo que hace que la demanda hacia los fabricantes baje y el consumo de los usuarios no se vea reflejado en satisfacción ni es el mayor posible. Por ello se le otorga 0 a ambos.
- El fabricante ofrece BaaP; pero el usuario tiene un incentivo mayor por comprar BaaS, lo que hace que la demanda hacia los fabricantes no sea tan alta como pudiera ser; sin embargo, las fábricas tienen que seguir produciendo las baterías porque el mercado las requiere para seguir operando y los usuarios seguirán necesitando de ellas. En este caso se le asigna un valor de +1 a la fábrica y 0 al usuario.

Nota: Se asigna ponderación uniforme a los tres criterios por tratarse de un ejercicio ilustrativo; análisis futuros pueden estimar ponderaciones endógenas mediante evidencia empírica o preferencias reveladas.

Resumiendo todo lo anterior se encuentran estos escenarios,

Tabla 10. Escenario de Pagos sin intervención del Gobierno

Escenarios de Pagos con G = N		"Match" entre F y U		"Mismatch" entre F y U	
		BaaS	BaaP	BaaS	BaaP
TCO	Fabricante	+1	+2	0	+1
	Usuario	0	+2	0	0
Stock	Fabricante	0	+2	0	+1
	Usuario	0	+1	0	0
LCOS	Fabricante	0	+2	0	+1
	Usuario	0	+2	0	0
TOTAL PAGOS	Fabricante	+1	+6	0	+3
	Usuario	0	+5	0	0

Nota: Mismatch ocurre cuando F ofrece una modalidad y U desea la otra

Fuente: Elaboración propia.

Que llevan a estas funciones de pago:

Tabla 11. Matriz de Pagos sin intervención del Gobierno

G=N		Usuario	
		A: BaaS	O: BaaP
Fabricante	B: BaaS	+1 0	0 0
	P: BaaP	+3 0	+6 +5

Nota: Los pagos representan un ranking ordinal de incentivos; la agregación es una aproximación para identificar equilibrios comparados sin calibración econométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Mejores respuestas:

- Si U elige O --> mejor respuesta de F es P (porque $6 > 0$)
- Si F elige P --> mejor respuesta de U es O (porque $5 > 0$)

Encontrando el equilibrio de Nash, cuando el gobierno no interviene, en las opciones en las cuales tanto el fabricante como el usuario se decantan por BaaP; es decir cuando la estrategia conjunta es $(S_f, S_u, S_g) = (P, O, N)$ por ser un perfil de estrategias en el que cada jugador está jugando una mejor respuesta a la estrategia del otro, por lo que no existen desvíos unilaterales rentables.

Con la intervención del gobierno ($G=I$)

Desde el punto de vista de TCO:

- El fabricante tiene un mayor incentivo para ofrecer BaaS, por ello se le otorga +2
- El fabricante tiene un incentivo menor para ofrecer BaaS, por ello se le otorga +1
- El usuario tiene un incentivo mayor para adoptar BaaS, por ello se le otorga +2
- El usuario tiene un incentivo menor para comprar BaaS, por ello se le otorga +1

Desde el punto de vista de Stock:

- El fabricante tiene un incentivo mayor para ofrecer BaaS, por ello se le otorga +2
- El fabricante tiene un incentivo menor para ofrecer BaaS, por ello se le otorga +1
- El usuario tiene un incentivo mayor para adoptar BaaS, por ello se le otorga +2
- El usuario tiene un incentivo menor para comprar BaaS, por ello se le otorga +1

Desde el punto de vista de LCOS:

- El fabricante tiene un incentivo mayor para ofrecer BaaS, por ello se le otorga +2
- El fabricante tiene un incentivo menor para ofrecer BaaS, por ello se le otorga +1
- El usuario tiene un incentivo mayor para adoptar BaaS, por ello se le otorga +2
- El usuario tiene un incentivo menor para comprar BaaS, por ello se le otorga +1

Todos esos escenarios son bajo el supuesto que los deseos de los fabricantes y los usuarios coinciden al elegir BaaS o BaaS; sin embargo, existen los posibles escenarios donde las preferencias son diferentes.

En los casos en los cuales los fabricantes eligen no ofrecer BaaS y los usuarios tienen preferencias por ese tipo de contratos, ambos sufren la consecuencia restando un poco de dinámica al mercado; por ello se consideran estos pagos:

Ante la intervención del gobierno ($G=I$), pero tanto fabricantes como usuarios eligen opciones diferentes:

Desde el punto de vista de TCO, Stock y LCOS:

- El fabricante ofrece BaaS; pero el usuario prefiere comprar BaaP. Esta situación sitúa al fabricante en una posición en la cual, aunque no saca el mayor provecho, tiene beneficios generados por el gobierno al promover la economía circular, además de los beneficios de ser parte de un oligopolio en la fabricación de baterías; por lo tanto, se le otorga un +2. Por su parte, el usuario desprecia los beneficios del Gobierno y paga más por tener BaaP, por eso se le otorga 0.
- El fabricante ofrece BaaP; pero el usuario tiene un incentivo mayor por comprar BaaS, lo que hace que la demanda hacia los fabricantes no sea tan alta como pudiera ser; sin embargo, las fábricas tienen que seguir produciendo las baterías porque el mercado las requiere para seguir operando y los usuarios seguirán necesitando de ellas. En este caso se le asigna un valor de +1 a la fábrica y +1 al usuario.

Nota: Se asigna ponderación uniforme a los tres criterios por tratarse de un ejercicio ilustrativo; análisis futuros pueden estimar ponderaciones endógenas mediante evidencia empírica o preferencias reveladas.

Resumiendo todo lo anterior se encuentran estos escenarios,

Tabla 12. Escenario de Pagos con intervención del Gobierno

Criterios		"Match" entre F y U		"Mismatch" entre F y U	
		BaaS	BaaP	BaaS	BaaP
TCO	Fabricante	+2	+1	+2	+1
	Usuario	+2	+1	+1	0
Stock	Fabricante	+2	+1	+2	+1
	Usuario	+2	+1	+1	0
LCOS	Fabricante	+2	+1	+2	+1
	Usuario	+2	+1	+1	0
TOTAL PAGOS	Fabricante	+6	+3	+6	+3
	Usuario	+6	+3	+3	0

Nota: Mismatch ocurre cuando F ofrece una modalidad y U desea la otra

Fuente: Elaboración propia.

Que llevan a estas funciones de pago:

Tabla 13. Matriz de Pagos con intervención del Gobierno

G=I		Usuario	
		A: BaaS	O: BaaP
Fabricante	B: BaaS	+6	+6
	P: BaaP	+3	+3

Nota: Los pagos representan un ranking ordinal de incentivos; la agregación es una aproximación para identificar equilibrios comparados sin calibración econométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Mejores respuestas:

- Si U elige A --> mejor respuesta de F es B (porque $6 > 3$)
- Si F elige B --> mejor respuesta de U es A (porque $6 > 0$)

Se encuentra el equilibrio de Nash, cuando el gobierno interviene, con las estrategias en las cuales tanto el fabricante como el usuario se decantan por BaaS; es decir cuando la estrategia conjunta es $(S_f, S_u, S_g) = (B, A, I)$ por ser un perfil de estrategias en el que cada jugador está jugando una mejor respuesta a la estrategia del otro, por lo que no existen desvíos unilaterales rentables.

La relativa estabilidad de los pagos del fabricante frente a la preferencia del usuario es consistente con una estructura de mercado concentrada y con poder de mercado aguas arriba, donde el fabricante internaliza beneficios por control del activo y escala. En un juego dinámico repetido, esta estabilidad podría variar si la adopción del usuario afecta aprendizaje, reputación, costos marginales o presión regulatoria que alteren el juego.

Propuestas de instrumentos de política pública (G)

La interacción estratégica analizada entre el Fabricante (F), el Gobierno (G) y el Usuario (U) puede caracterizarse fundamentalmente como un juego de coordinación. En esta clase de juegos no cooperativos, los agentes obtienen mayores beneficios cuando sus decisiones son compatibles entre sí, y el problema central no es la competencia pura, sino la coordinación de expectativas para alcanzar un resultado mutuamente conveniente. Como señala Gibbons (1992), estos juegos suelen presentar múltiples equilibrios de Nash, algunos de los cuales son ineficientes; esto explica por qué el mercado de baterías puede

permanecer en un equilibrio subóptimo debido a la incertidumbre, la falta de información común o los altos costos de transición hacia el estándar de la economía circular.

En este contexto, la reutilización hacia baterías de segunda vida (SLB) requiere condiciones mínimas de trazabilidad, certificación, calidad y logística inversa. Si estas condiciones no se implementan de forma coordinada, el mercado puede no escalar aun cuando exista potencial económico, reflejando una falla típica de coordinación. Por ello, la literatura de diseño de mercados aporta un marco para ajustar las reglas del juego mediante instituciones, estándares y mecanismos que reduzcan fricciones y alineen incentivos. El diseño de mercados es especialmente útil cuando los precios no bastan para garantizar eficiencia por asimetrías de información o fallas de coordinación (Roth, 2002), permitiendo desplazar el equilibrio hacia resultados más eficientes.

Con el objetivo de fortalecer la economía circular, se proponen instrumentos de política pública que podrían equilibrar el juego entre fabricantes y usuarios, con la intervención del gobierno. A continuación, se detalla el funcionamiento de los instrumentos propuestos:

Incentivos fiscales a la producción y ecodiseño: El Gobierno (G) utiliza este mecanismo para reducir los costos de transición del Fabricante (F). Al ofrecer beneficios tributarios, el gobierno incentiva a los fabricantes a adoptar diseños modulares, lo cual es una señal de coordinación esencial para que el mercado secundario sea técnicamente viable y menos costoso de operar.

Subsidios a la compra de VE y sistemas de almacenamiento: Mediante la entrega de subsidios, el Gobierno (G) estimula la demanda por parte del Usuario (U). Esto asegura la creación de una masa crítica de baterías en uso que, en el futuro, mejorará la oferta necesaria para la industria de segunda vida, reduciendo el riesgo de inversión para todos los actores del ecosistema.

Normativa de Responsabilidad Extendida del Productor (REP): El Gobierno (G) establece esta regla de diseño de mercado para obligar al Fabricante (F) a internalizar el costo del fin de vida de sus productos. Esta política es el motor que fuerza la creación de sistemas de logística inversa, evitando que el mercado permanezca en un equilibrio ineficiente de "usar y tirar".

Apoyo a la I+D en tecnologías de remanufactura y diagnóstico: El Gobierno (G) financia la mejora de los procesos de evaluación técnica. Al invertir en ciencia y tecnología, G reduce la incertidumbre tecnológica y genera una "información común" confiable sobre el estado de las baterías, lo que facilita que tanto fabricantes como usuarios confíen en la integridad del activo reutilizado.

Estándares de certificación y etiquetado para baterías SLB: Para resolver las asimetrías de información, el Gobierno (G) crea sellos de calidad. Siguiendo a Roth (2002), esta intervención del gobierno brinda seguridad al Usuario (U) y profesionaliza la oferta, impidiendo que el mercado colapse por la presencia de productos de dudosa procedencia o baja calidad.

Impuestos al carbono y tasas de disposición final: El Gobierno (G) penaliza las opciones lineales que dañan el medio ambiente. Al encarecer el desecho de baterías, el gobierno empuja económicamente a los agentes hacia la coordinación circular, haciendo que el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad sea también la estrategia más rentable para el Fabricante (F); logrando que el resultado de alta circularidad sea el único equilibrio de Nash estratégicamente rentable a largo plazo.

Tabla 14. Propuestas de instrumentos de política pública

Instrumento de política pública	¿Qué corrige?	¿Cómo favorece BaaS/SLB?	Efecto esperado sobre LCOS-SLB
Incentivos fiscales a la producción y ecodiseño	Barreras de entrada por CAPEX fijo	Acelera inversión en reacondicionamiento y BOS	↓ CAPEX efectivo / ↓ repurposing
Subsidios a la compra de VE y sistemas de almacenamiento	Falta de demanda inicial (coordination failure)	Crea mercado para SLB y escala industrial	↓ LCOS vía escala
Responsabilidad Extendida del Productor (REP/EPR)	Externalidad de disposición final y coordinación	Obliga retorno y gestión del ciclo de vida → facilita trazabilidad	↓ costos de recolección y selección
Apoyo a la I+D en tecnologías de remanufactura y diagnóstico	Asimetría de información (SoH, historial)	Reduce incertidumbre técnica y riesgo del reacondicionamiento	↓ costos de diagnóstico y fallas
Estándares técnicos de seguridad y certificación (UL/IEC)	Riesgo técnico y reputacional	Estandariza calidad mínima del SLB	↓ fallas → ↑ energía útil entregada
Impuestos al carbono y tasas de disposición final	Ineficiencia de "crear y tirar"	Garantiza la disposición final e incentiva el uso de Baterías de segunda vida	= Puede mantenerlo en equilibrio

Fuente: Elaboración propia).

El análisis del juego estratégico F-G-U demuestra que, sin la intervención del Gobierno (G), el mercado tiende a un equilibrio subóptimo basado en el modelo de Batería-como-Producto (BaaP), lo que fragmenta la trazabilidad y debilita la economía circular. No obstante, bajo el enfoque de la teoría de coordinación y el diseño de mercados, la implementación de instrumentos de política pública permite desplazar este equilibrio hacia el modelo de Batería-como-Servicio (BaaS). Esta transición no solo reduce los costos de transacción y mejora el flujo de retorno de las baterías, sino que alinea las expectativas intertemporales de los agentes para garantizar que la reutilización (SLB) sea estratégica y económicamente viable.

En última instancia, los hallazgos de este módulo demuestran que la competitividad de las baterías de segunda vida no es únicamente una función de variables tecnológicas o de costos de manufactura. Es, ante todo, una función institucional que depende de la existencia de reglas claras que incentiven la trazabilidad y la responsabilidad compartida durante todo el ciclo de vida del activo. Así, el diseño de mercados se posiciona como la herramienta clave para que el Gobierno logre alinear los intereses privados con los objetivos superiores de la economía circular, garantizando que el potencial de las SLB se traduzca en una realidad de mercado eficiente y sostenible.

CONCLUSIONES

El Resultado analítico del Módulo A confirma la intuición microeconómica derivada del modelo TCO: cuando el activo subyacente (la batería en este caso) se vuelve más barato y confiable, el costo esperado de la propiedad disminuye, reduciendo el espacio económico en el cual el consumidor estaría dispuesto a pagar una prima por transferir el riesgo al proveedor del servicio. En consecuencia, el esquema BaaS enfrenta una presión estructural a la baja sobre sus tarifas, obligando a los proveedores a ofrecer precios cada vez más competitivos para mantener su atractivo frente a la compra directa de la batería

La estimación stock-flujo basada en la difusión de vehículos eléctricos demuestra que el flujo de baterías disponibles para segunda vida (SLB) está limitado por rezagos tecnológicos y por la dinámica de retiro del parque automotor eléctrico, por lo que no es suficiente para cubrir por sí sola la demanda proyectada de almacenamiento estacionario en el horizonte 2035. Esto implica que el mercado no puede asumir que la circularidad emergerá automáticamente: la restricción de oferta es estructural y no solo de precios.

El análisis de costo nivelado de almacenamiento (LCOS) evidencia que un menor CAPEX inicial de SLB no garantiza un menor costo nivelado de almacenamiento (LCOS-SLB), dado que los costos de reacondicionamiento, reemplazos anticipados y menor energía útil entregada pueden dominar el resultado económico. En términos prácticos, SLB es competitivo únicamente si existen condiciones de integración y estandarización que reduzcan la incertidumbre técnica y los costos transaccionales. Por tanto, el menor precio de adquisición no garantiza por sí mismo un LCOS-SLB inferior al de baterías nuevas.

En ausencia de intervención estatal, el equilibrio competitivo tenderá a favorecer el modelo Baterías como servicio tanto en el corto como en el largo plazo, debido a que la compra se vuelve relativamente más atractiva para el usuario, la oferta de baterías de segunda vida es limitada y heterogénea, y a que el costo nivelado de almacenamiento de energía usando baterías de segunda vida puede no superar económicamente al almacenamiento con baterías nuevas en escenarios realistas.

La interacción estratégica entre fabricante, usuario y gobierno sugiere que, en ausencia de reglas que faciliten trazabilidad y recuperación eficiente, el equilibrio puede favorecer arreglos donde el activo permanece disperso y la reutilización se limita. Instrumentos de política pública como estándares, responsabilidad extendida del productor y sistemas de trazabilidad pueden actuar como mecanismos de coordinación capaces de desplazar el equilibrio hacia resultados más compatibles con economía circular y escalamiento de SLB. Esto ocurre porque la política pública puede internalizar externalidades, corregir fallas de coordinación y reducir costos estructurales de trazabilidad, recolección y estandarización, que el mercado por sí solo no resuelve.

En conclusión, este trabajo evidencia una tensión estructural al observar que el resultado que tiende a dominar en el mercado desde la lógica del consumidor (la batería como producto - BaaP) no garantiza el resultado socialmente más eficiente si se busca acelerar la economía circular, aumentar la disponibilidad de baterías de segunda vida (SLB) y reducir presiones ambientales y de suministro sobre el sistema energético. Por ello, la expansión de esquemas de batería como servicio (BaaS) y la consolidación del mercado de baterías de segunda vida no dependen únicamente de que el precio de las baterías nuevas continúe cayendo, sino de reglas e instrumentos que reordenen la asignación de riesgos, fortalezcan la trazabilidad y alineen los incentivos privados con los objetivos de sostenibilidad. Sin ese rediseño institucional, la circularidad seguirá siendo un resultado parcial, fragmentado y subóptimo, incluso en un escenario de avances tecnológicos y reducción de costos.

REFERENCIAS

Andreassen, G. L., & Lind, J. T. (2024). Depreciation and the value of electric vehicles: Evidence from Norway. *Environmental and Resource Economics*. <https://doi.org/10.1007/s10640-024-00872-z>

Bain, J. S. (1956). *Barriers to new competition: Their character and consequences in manufacturing industries*. Harvard University Press.

Baumol, W. J., Panzar, J. C., & Willig, R. D. (1982). *Contestable markets and the theory of industry structure*. Harcourt Brace Jovanovich.

BloombergNEF. (2024). Lithium-ion batteries: State of the industry 2024. Bloomberg Finance L.P. <https://about.bnef.com/insights/lithium-ion-batteries-state-of-the-industry-2024/>

BloombergNEF. (2024a, December 10). Lithium-ion battery pack prices see largest drop since 2017, falling to \$115/kWh. Bloomberg Finance L.P. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017/>

BloombergNEF. (2024b, February 19). Lithium-ion battery recycling market outlook 2024. Bloomberg Finance L.P.

BloombergNEF. (2025a, January 15). Energy storage: 10 things to watch in 2025. Bloomberg Finance L.P.

BloombergNEF. (2025b, April 29). 1H 2025 US clean energy market outlook: Tariff uncertainty. Bloomberg Finance L.P.

BloombergNEF. (2025c, April 30). 1H 2025 energy storage market outlook. Bloomberg Finance L.P. <https://about.bnef.com/insights/1h-2025-energy-storage-market-outlook/>

Bobba, S., Mathieux, F., Ardente, F., Blengini, G. A., Cusenza, M. A., Podias, A., & Pfrang, A. (2018). Life cycle assessment of repurposed electric vehicle batteries: An adapted method based on modelling energy flows. *Journal of Energy Storage*, 19, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.07.008>

Bulow, J. I. (1982). Durable-goods monopolists. *Journal of Political Economy*, 90(2), 314–332.

Chinchilla-Guarín, L. A., & García-Rendón, J. J. (2024). Power purchase agreement mechanism design for utility scale non-conventional renewable energy projects: Evidence from Colombia (SSRN Working Paper No. 4918192). SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4918192>

Coase, R. H. (1972). Durability and monopoly. *Journal of Law and Economics*, 15(1), 143–149.

European Commission. (2023). Battery passport framework under the EU Battery Regulation. European Commission. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-storage_en

European Commission. (2023). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries. *Official Journal of the European Union*.

Gibbons, R. (1992). *A primer in game theory*. Prentice Hall.

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>

IEA - International Energy Agency. (2024). *Global EV outlook 2024: Moving towards increased affordability*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>

IEA - International Energy Agency. (2025). *Global EV outlook 2025: Expanding sales in diverse markets*. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-ev-outlook-2025>

International Finance Corporation. (2021). *Environmental and social management system (ESMS): Implementation handbook*. IFC. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_handbook_esms

International Renewable Energy Agency. (2020). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2020/Oct/Electricity-Storage-and-Renewables-Costs-and-Markets>

International Renewable Energy Agency. (2022). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030 (Updated/insights as cited in thesis)*. IRENA. <https://www.irena.org/publications>

Jorgenson, D. W. (1963). Capital theory and investment behavior. *The American Economic Review*, 53(2), 247–259.

Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>

Martínez-Laserna, E., Sarasketa-Zabala, E., Villarreal, I., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., Warnecke, A., Timmermans, J.-M., Goutam, S., Rodriguez, P., & Sauer, D. U. (2018). Technical viability of battery second life: A study from the ageing perspective. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3), 2703–2713. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2791276>

Nazman, L. (2023, March 27). How long do electric car batteries last?. Recurrent. <https://www.recurrentauto.com/research/how-long-do-ev-batteries-last>

Porter, M. E. (1980). *Competitive strategy: Techniques for analyzing industries and competitors*. Free Press.

Roth, A. E. (2002). The economist as engineer: Game theory, experimentation, and computation as tools for design economics. *Econometrica*, 70(4), 1341–1378. <https://doi.org/10.1111/1468-0262.00335>

Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A., & Staffell, I. (2019). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Joule*, 3(1), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>

Statista. (2024a). Lithium-ion batteries: Industry dossier. Statista. <https://www.statista.com/study/117094/lithium-ion-batteries-industry-dossier/>

Statista. (2024b). Electric vehicles: Market report. Statista. <https://www.statista.com/study/103895/electric-vehicles-report/>

Steckel, T., Kendall, A., & Ambrose, H. (2021). Applying levelized cost of storage methodology to utility-scale second-life battery energy storage systems. *Applied Energy*, 300, 117309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117309>

Sutton, J. (1991). *Sunk costs and market structure: Price competition, advertising, and the evolution of concentration*. MIT Press.

Tirole, J. (1988). *The theory of industrial organization*. MIT Press.

United Nations. (2023). The Sustainable Development Goals report 2023. United Nations. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>

Varian, H. R. (2014). *Intermediate microeconomics: A modern approach* (9th ed.). W. W. Norton & Company.

Visnjic, I., Wiengarten, F., & Neely, A. (2022). Only the brave: Product innovation, service business model innovation, and their impact on performance. *Journal of Operations Management*, 68(2), 100–123. <https://doi.org/10.1002/joom.1203>

Waldman, M. (2003). Durable goods theory for real world markets. *Journal of Economic Perspectives*, 17(1), 131–154. <https://doi.org/10.1257/089533003321164958>

Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>

Zhou, X., Pang, B., & Tang, R. (2025). As a service or a product? A comparison of electric vehicle battery supply models. *Omega*, 130, 103166. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103166>

ANEXOS

Código fuente para Tunel de Viabilidad

```
import React, { useState, useMemo } from 'react';
import { BATTERY_DATA } from './data';
import { calculateScenario } from './utils/calculations';
import { SimulationParams } from './types';
import { ControlPanel } from './components/ControlPanel';
import { MainChart, CompositionChart } from './components/Charts';
import { DataTable } from './components/DataTable';
import { RangeAnalysis } from './components/RangeAnalysis';

const App: React.FC = () => {
  // Updated defaults within new ranges
  const [params, setParams] = useState<SimulationParams>({
    riskPercentage: 0.035,
    maintenancePercentage: 0.02,
    lifespanYears: 10,
    discountRate: 0.10,
    residualValuePercentage: 0.05,
    useTableRisk: true,
  });

  const [activeTab, setActiveTab] = useState<'sim' | 'range'>('sim');

  const calculatedData = useMemo(() => {
    return calculateScenario(BATTERY_DATA, params);
  }, [params]);

  const currentX = calculatedData.find(d => d.year === 2024)?.xValue || 0;

  return (
    <div className="min-h-screen bg-slate-50 p-2 md:p-6 lg:p-8 font-sans">
      <header className="max-w-7xl mx-auto mb-6 flex flex-col md:flex-row md:items-center justify-between gap-4">
        <div>
          <h1 className="text-2xl md:text-3xl font-extrabold text-slate-900 tracking-tight">
            Análisis Económico: Pack de Baterías
          </h1>
          <p className="text-slate-500 mt-1 text-sm md:text-base">
            Modelo de sensibilidad VP(Fee)
          </p>
        </div>

        { /* KPI Card */ }
        <div className="bg-white px-5 py-3 rounded-xl border border-slate-200 shadow-sm flex items-baseline gap-3">
          <span className="text-sm font-medium text-slate-500 uppercase tracking-wide">VP(Fee)
            (2024)</span>
          <span className="text-2xl font-bold text-indigo-600">${currentX.toFixed(2)}</span>
        </div>
      </header>
    </div>
  );
};
```

```

    <span className="text-xs text-slate-400">/ kWh</span>
  </div>
</header>

<main className="max-w-7xl mx-auto grid grid-cols-1 lg:grid-cols-12 gap-6">
  {/* Left Column: Controls - Sticky */}
  <div className="lg:col-span-3">
    <div className="sticky top-6">
      <ControlPanel params={params} setParams={setParams} />
    </div>
  </div>

  {/* Right Column: Content */}
  <div className="lg:col-span-9 flex flex-col gap-6">

    {/* Tab Navigation */}
    <div className="bg-white p-1 rounded-lg border border-slate-200 shadow-sm inline-flex self-start">
      <button
        onClick={() => setActiveTab('sim')}
        className={`px-4 py-2 text-sm font-medium rounded-md transition-all ${
          activeTab === 'sim'
            ? 'bg-indigo-50 text-indigo-700 shadow-sm ring-1 ring-indigo-200'
            : 'text-slate-500 hover:text-slate-700 hover:bg-slate-50'
        }`}
      >
        Simulador Principal
      </button>
      <button
        onClick={() => setActiveTab('range')}
        className={`px-4 py-2 text-sm font-medium rounded-md transition-all ${
          activeTab === 'range'
            ? 'bg-indigo-50 text-indigo-700 shadow-sm ring-1 ring-indigo-200'
            : 'text-slate-500 hover:text-slate-700 hover:bg-slate-50'
        }`}
      >
        Análisis de Límites
      </button>
    </div>

    {activeTab === 'sim' ? (
      <div className="space-y-6 animate-fade-in">
        {/* Equation Display */}
        <div className="bg-indigo-900 text-white p-6 rounded-xl shadow-lg relative overflow-hidden">
          <div className="absolute top-0 right-0 w-32 h-32 bg-white/5 rounded-full -mr-10 -mt-10"></div>
          <h2 className="text-xs font-bold opacity-70 mb-2 uppercase tracking-widest">Fórmula
General</h2>
          <div className="font-mono text-lg md:text-2xl overflow-x-auto whitespace-nowrap z-10 relative">
            
$$VP(\text{Fee}) = P \text{pack} - VP(\text{Resid}) + VP(\text{Mtm}) + VP(\text{Risk})$$

          </div>
          <div className="mt-4 flex gap-4 text-xs opacity-80 flex-wrap">
            <span className="bg-white/10 px-2 py-1 rounded">Resid: 0-30%</span>
            <span className="bg-white/10 px-2 py-1 rounded">Mtm: 0-5%</span>
            <span className="bg-white/10 px-2 py-1 rounded">Risk: 0-10%</span>
          </div>
        </div>
      </div>
    ) : (
      <div>
        <h2>Análisis de Límites</h2>
      </div>
    )}
  </div>

```

```

    </div>

    <MainChart data={calculatedData} />

    <div className="grid grid-cols-1 md:grid-cols-2 gap-6">
      <CompositionChart data={calculatedData} />
      <div className="bg-white p-6 rounded-xl border border-slate-200 shadow-sm flex flex-col justify-
center">
        <h4 className="text-slate-800 font-bold mb-4">Configuración Actual</h4>
        <ul className="space-y-3 text-sm text-slate-600">
          <li className="flex justify-between border-b border-slate-50 pb-2">
            <span>Horizonte Temporal:</span>
            <span className="font-mono font-semibold text-slate-800">{params.lifespanYears}
años</span>
          </li>
          <li className="flex justify-between border-b border-slate-50 pb-2">
            <span>Tasa Descuento:</span>
            <span className="font-mono font-semibold text-slate-800">{(params.discountRate *
100).toFixed(1)}%</span>
          </li>
          <li className="flex justify-between border-b border-slate-50 pb-2">
            <span>Mantenimiento Total (VP):</span>
            <span className="font-mono font-semibold text-amber-600">
              {(params.maintenancePercentage * 100).toFixed(1)}% anual
            </span>
          </li>
          <li className="flex justify-between pt-2">
            <span>Riesgo Aplicado:</span>
            <span className="font-mono font-semibold ${params.useTableRisk ? 'text-blue-600' : 'text-
indigo-600'}">
              {params.useTableRisk ? 'Tabla (Variable)' : `${(params.riskPercentage * 100).toFixed(1)}%
(Fijo)`}
            </span>
          </li>
        </ul>
      </div>
    </div>

    <DataTable data={calculatedData} />
  </div>
): {
  <RangeAnalysis data={calculatedData} />
}
</div>
</main>
</div>
);
};

export default App;

```

Código fuente para Modelo LCOS vs LCOS-SLB

```
import React, { useState, useMemo } from 'react';
import { calculateScenariolCOS } from './utils/calculations';
import { GlobalParams, ScenarioParams } from './types';
import { SimulationControls } from './components/SimulationControls';
import { ResultsView } from './components/ResultsView';
import { TheorySection } from './components/TheorySection';
import { Calculator, BookOpen, Menu } from 'lucide-react';

const App: React.FC = () => {
  const [activeTab, setActiveTab] = useState<'model' | 'theory'>('model');
  const [isSidebarOpen, setSidebarOpen] = useState(true);

  // Default values based on thesis prompt and Steckel et al. (2021)
  const [globalParams, setGlobalParams] = useState<GlobalParams>({
    horizonYears: 15,
    discountRate: 8, // r
    systemSizeMW: 10, // Utility Scale
    durationHours: 4,
    energyPrice: 0,
    cyclesPerYear: 365, // Daily cycling
  });

  const [newScenario, setNewScenario] = useState<ScenarioParams>({
    name: 'Li-ion Nueva',
    initialCapexPerKWh: 300, // Resulting in somewhat closer to 211 USD/MWh LCOS
    opexPerKWhYear: 6,
    batteryLifeYears: 15, // Lasts full horizon in this simplified model
    replacementCostPerKWh: 250,
    repurposingCostPerKWh: 0,
    degradationRate: 2.0,
    dod: 90,
    roundTripEfficiency: 95, // Not used in denominator directly but implies quality
  });
```

```

const [slbScenario, setSlbScenario] = useState<ScenarioParams>({
  name: 'Li-ion SLB',
  initialCapexPerKWh: 160, // ~53% of New Capex (Aggressive SLB case)
  opexPerKWhYear: 9, // Higher Opex for SLB
  batteryLifeYears: 7, // Needs replacement twice in 15 years
  replacementCostPerKWh: 140,
  repurposingCostPerKWh: 40, // Adder for testing/BOS
  degradationRate: 3.5, // Faster degradation
  dod: 80, // Lower DoD to preserve life
  roundTripEfficiency: 85,
});

// Calculate results on the fly
const newResult = useMemo(() => calculateScenarioLCOS(newScenario, globalParams), [newScenario,
globalParams]);
const slbResult = useMemo(() => calculateScenarioLCOS(slbScenario, globalParams), [slbScenario,
globalParams]);

return (
  <div className="min-h-screen bg-slate-100 flex flex-col font-sans text-slate-900">

    {/* Header */}
    <header className="bg-white border-b border-slate-200 sticky top-0 z-10 px-6 py-3 flex items-center
justify-between shadow-sm">
      <div className="flex items-center gap-3">
        <div className="p-2 bg-blue-600 rounded-lg text-white">
          <Calculator size={20} />
        </div>
        <div>
          <h1 className="font-bold text-lg leading-tight">Modelo LCOS: Utility-Scale</h1>
          <p className="text-xs text-slate-500">Tesis de Grado: Comparativa Nueva vs. SLB</p>
        </div>
      </div>

    <div className="flex items-center gap-2 bg-slate-100 p-1 rounded-lg">
      <button

```

```

onClick={() => setActiveTab('model')}
className={`px-4 py-1.5 rounded-md text-sm font-medium transition-all flex items-center gap-2
${activeTab === 'model' ? 'bg-white text-blue-600 shadow-sm' : 'text-slate-500 hover:text-slate-700'}}
>
<Calculator size={16} />
Modelo Interactivo
</button>
<button
onClick={() => setActiveTab('theory')}
className={`px-4 py-1.5 rounded-md text-sm font-medium transition-all flex items-center gap-2
${activeTab === 'theory' ? 'bg-white text-blue-600 shadow-sm' : 'text-slate-500 hover:text-slate-700'}}`
>
<BookOpen size={16} />
Teoría (Tesis)
</button>
</div>
</header>

{/* Main Content */}
<main className="flex-1 overflow-hidden relative flex">

{activeTab === 'model' ? (
  <>
    {/* Sidebar Controls */}
    <div className={`bg-slate-50 border-r border-slate-200 w-full md:w-[400px] lg:w-[450px] shrink-0 flex
flex-col transition-all duration-300 ${isSidebarOpen ? 'translate-x-0' : '-translate-x-full absolute h-full z-20'}}`>
      <div className="p-4 border-b border-slate-200 bg-white flex justify-between items-center sticky top-
0">
        <h2 className="font-bold text-slate-700">Parámetros de Entrada</h2>
        <button onClick={() => setSidebarOpen(false)} className="md:hidden text-slate-
400"><Menu/></button>
      </div>
      <div className="flex-1 overflow-hidden p-4">
        <SimulationControls
          globalParams={globalParams}
          setGlobalParams={setGlobalParams}

```

```

        newScenario={newScenario}
        setNewScenario={setNewScenario}
        slbScenario={slbScenario}
        setSlbScenario={setSlbScenario}
    />
</div>
</div>

{/* Main Visualization Area */}
<div className={`flex-1 overflow-hidden flex flex-col transition-all duration-300 ${isSidebarOpen ? " :
'ml-0'}`}>
    <div className="p-4 md:p-6 lg:p-8 flex-1 overflow-hidden h-full">
        {!isSidebarOpen && (
            <button onClick={() => setSidebarOpen(true)} className="mb-4 flex items-center gap-2 text-sm text-
blue-600 font-medium bg-white px-3 py-2 rounded border shadow-sm absolute top-4 left-4 z-10">
                <Menu size={16}/> Mostrar Controles
            </button>
        )}
        <ResultsView newResult={newResult} slbResult={slbResult} />
    </div>
</div>
</>
): (
    <div className="w-full h-full overflow-y-auto bg-slate-50">
        <TheorySection />
    </div>
)}
</main>
</div>
);
};

export default App;

```