

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**GESTIÓN DE BATERÍAS DE ION-LITIO FUERA DE USO EN LA  
ELECTROMOVILIDAD CHILENA HACIA 2060**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL  
INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**MARÍA FERNANDA RAMÍREZ BECERRA**

**PROFESOR GUÍA**

**MARÍA PILAR GÁRATE CHATEAU**

**SANTIAGO DE CHILE, 21 DE NOVIEMBRE DE 2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Gestión de baterías de ion-litio fuera de uso en la electromovilidad chilena hacia 2060.

Nombre del candidato(a): María Fernanda Ramírez Becerra

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Vitacura Departamento: Industrias

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, María Pilar Gárate, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un período de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

---

---

---

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21/11/2025 Firma: Pilar Gárate Ch.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/11/2025 Firma: [Firma]

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

## **Agradecimientos**

Esta memoria está dedicada principalmente a mis padres, que sin ellos nada de esto sería posible, siempre estaré agradecida de todo lo que me apoyaron en este proceso y me dieron la energía para seguir cuando sentía que no podía más.

A mi Catita que tuvimos la suerte de estar en el mismo proceso universitario, gracias por siempre apoyarme no solo en lo académico sino también en lo emocional.

A mi tía Edith que, si bien ya no está presente en este plano terrenal para verme finalizar el proceso, sé que está conmigo siempre.

Quiero agradecerle a mi José Ignacio, mi pololo que siempre me apoyo dándome ánimos con sus palabras de aliento para poder seguir. Gracias por siempre estar ahí para mí.

Una mención especial a mi hijo perruno Sam que estuvo trasnochando todas las noches de estudio conmigo.

Agradezco a mi profesora guía por todas sus enseñanzas y recomendaciones en todo el proceso de la memoria.

Finalmente, agradezco a todos mis amigos de la universidad por siempre estar presente en las tardes de estudio y por darse ánimos mutuamente en las pruebas.

## **Resumen Ejecutivo**

En Chile, la reducción de emisiones asociadas a los gases de efecto invernadero se aborda mediante la Estrategia Nacional de Electromovilidad, la cual promueve un crecimiento progresivo del parque de vehículos eléctricos. Este proceso conlleva un incremento proporcional en el uso de baterías de ion-litio que una vez alcanzado el fin de su vida útil, generarán un volumen creciente de residuos que requerirá una gestión adecuada.

La presente investigación desarrolla una proyección de generación de baterías fuera de uso (BFU) y propone el diseño de un sistema integral de gestión orientado a su trazabilidad, recolección y valorización. Para ello, se combina un enfoque de modelación cuantitativa, análisis normativo y planificación estratégica, con el objetivo de definir los lineamientos técnicos e institucionales necesarios para implementar en Chile un modelo de economía circular aplicable a las baterías de electromovilidad.

A partir de los escenarios desarrollados, se estimó que la generación acumulada de BFU podría superar los 1,8 millones de toneladas al año 2060 en el escenario base, y alcanzar hasta 3,6 millones de toneladas en un escenario optimista, evidenciando un crecimiento exponencial correspondiente al aumento del parque vehicular eléctrico. En el escenario pesimista hay una menor cantidad de residuos proyectados con un volumen que asciende a 1,2 millones de toneladas,

lo que confirma el desafío logístico y ambiental que enfrentará el país durante las próximas décadas.

El modelo propuesto se estructura bajo la metodología PDCA (Plan – Do – Check – Act), permitiendo ordenar las acciones de implementación en fases secuenciales y medibles. En la etapa de planificación, se establecieron metas SMART que contemplan alcanzar una tasa de recolección del 90 %, una valorización local superior al 80 % y una capacidad instalada de 400.000 ton/año hacia 2060. Estas metas se sustentan en la creación de un Registro Nacional de Baterías (RNB), compatible con los sistemas de la SEC y Aduanas, y en la implementación de un pasaporte digital que asegure la trazabilidad de cada batería desde su importación hasta su disposición final.

El análisis realizado identificó como actores clave al Ministerio del Medio Ambiente (MMA), la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), CORFO y el sector industrial, cuyas funciones son esenciales para garantizar la gobernanza del sistema. La incorporación de incentivos financieros, programas de formación técnica y auditorías periódicas permitirá fortalecer la cadena de valor y promover la valorización local de materiales estratégicos.

En conjunto, los resultados demuestran que Chile posee las condiciones institucionales y técnicas para consolidar una gestión capaz de responder a los desafíos

que conlleva la electromovilidad y de posicionar al país como referente regional en la gestión sostenible de residuos tecnológicos. Este estudio entrega una base cuantitativa y de gestión aplicable al diseño de políticas públicas orientadas a la transición energética y a la economía circular.

## **Abstract**

In Chile, the reduction of greenhouse gas-related emissions is addressed by the National Electromobility Strategy, which promotes the progressive growth of the electric vehicle fleet. This process entails a proportional growth in the use of lithium-ion batteries which, once they reach their end-of-life, will generate a growing volume of waste requiring proper management. The present study develops a projection of the generation of end-of-life batteries (EoL batteries) and proposes the design of a comprehensive management system focused on their traceability, collection, and valorisation. To this end, it combines a quantitative modelling approach, regulatory analysis, and strategic planning, with the objective of defining the technical and institutional guidelines necessary to implement a circular economy model in Chile applicable to electromobility batteries. Based on the scenarios developed, it was estimated that the cumulative generation of EoL batteries could exceed 1.8 million tonnes by 2060 in the baseline scenario, and reach up to 3.6 million tonnes in an optimistic scenario, evincing exponential growth corresponding to the increase in the electric vehicle fleet. In the pessimistic scenario there is a smaller quantity of projected waste, with a volume that reaches 1.2 million tonnes, which confirms the logistical and environmental challenge the country will face in the coming decades. The proposed model is structured according to the PDCA (Plan-Do-Check-Act) methodology, allowing implementation actions to be orga-

nised into sequential and measurable phases. In the planning stage, SMART goals were established that include reaching a collection rate of 90 %, local valorisation exceeding 80 % and an installed capacity of 400.000 tonnes/year by 2060. These goals are supported by the creation of a National Battery Registry (NBR), compatible with the SEC and Customs systems, and by the implementation of a digital passport which ensures the traceability of each battery from its importation to its final disposal. The analysis identified the Ministry of the Environment (MMA), the Superintendency of Electricity and Fuels (SEC), CORFO, and the industrial sector as key stakeholders, whose roles are essential to guarantee the system's governance. The incorporation of financial incentives, technical training programmes, and periodic audits will strengthen the value chain and promote the local valorisation of strategic materials. Altogether, the results demonstrate that Chile has the institutional and technical conditions to consolidate a management system capable of responding to the challenges posed by electromobility and to position the country as a regional leader in the sustainable management of technological waste. This study provides a quantitative and management basis applicable to the design of public policies oriented toward the energy transition and the circular economy.

## Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Problema de Investigación</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>21</b>
3.1	Objetivo General . . . . .	21
3.2	Objetivos Específicos . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Limitaciones y Alcances</b>	<b>23</b>
4.1	Limitaciones . . . . .	23
4.2	Alcances . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>27</b>
5.1	Cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero . . .	27
5.1.1	Contexto global y nacional del cambio climático . . . . .	27
5.1.2	Situación de Chile y compromisos en reducción de GEI . . .	28
5.2	Electromovilidad como estrategia de descarbonización . . . . .	30
5.2.1	Definición y clasificación de vehículos eléctricos . . . . .	30
5.2.2	Ventajas y desafíos . . . . .	32
5.2.3	Evolución global del mercado . . . . .	33

5.3	Contexto de la electromovilidad en Chile . . . . .	35
5.3.1	Estrategia Nacional de Electromovilidad . . . . .	35
5.3.2	Evolución histórica de las ventas de vehículos eléctricos en Chile . . . . .	37
5.3.3	Incentivos y subsidios . . . . .	38
5.3.4	Barreras para la adopción . . . . .	40
5.4	Tecnología de baterías para vehículos eléctricos . . . . .	42
5.4.1	Tipos de baterías . . . . .	42
5.4.2	Ciclo de vida . . . . .	43
5.4.3	Impacto ambiental . . . . .	44
5.5	Gestión de baterías fuera de uso (BFU) . . . . .	47
5.5.1	Segunda vida . . . . .	47
5.5.2	Reciclaje . . . . .	49
5.5.3	Legislación internacional y nacional . . . . .	51
5.5.4	Capacidades actuales en Chile . . . . .	53
5.6	Modelos y estrategias de planificación . . . . .	54
5.6.1	Benchmarking internacional . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Metodología</b>	<b>57</b>
6.1	Fuente principal de proyecciones . . . . .	57

6.2	Formulación matemática del modelo . . . . .	58
6.3	Implementación computacional en Python . . . . .	62
6.4	Metodología basada en el ciclo PDCA . . . . .	63
6.4.1	Plan (Planificar) . . . . .	64
6.4.2	Do (Hacer) . . . . .	65
6.4.3	Check (Verificar) . . . . .	65
6.4.4	Act (Actuar) . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Desarrollo y Análisis</b>	<b>68</b>
7.1	Supuestos . . . . .	69
7.2	Resultados cuantitativos . . . . .	73
7.2.1	Estimación de generación de BFU (2026–2060) . . . . .	73
7.2.2	Comparación de escenarios y metas proyectadas . . . . .	77
7.3	Análisis estratégico . . . . .	79
7.3.1	Comparación con la capacidad nacional instalada . . . . .	79
7.3.2	Brechas identificadas . . . . .	80
7.3.3	Infraestructura de reciclaje y segunda vida . . . . .	84
7.4	Ciclo PDCA para la gestión de residuos de las baterías fuera de uso (BFU) . . . . .	86
7.4.1	Planificar (Plan) . . . . .	86

7.4.2	Hacer (Do) . . . . .	92
7.4.3	Verificar (Check) . . . . .	100
7.4.4	Actuar (Act) . . . . .	103
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>125</b>
<b>9</b>	<b>Anexos</b>	<b>134</b>
9.1	Anexo A: Proyecciones anuales de generación de BFU . . . . .	134
9.2	Anexo B: Carta Gantt . . . . .	137

## Índice de figuras

5.1	Emisiones y absorciones de GEI por sector en Chile (1990–2022) (elaboración propia en base a datos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2024 (Ministerio del Medio Ambiente, 2024)). . . . .	29
5.2	Hitos de la Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile (Ministerio de Energía, 2021). . . . .	36
7.1	Proyección del parque de vehículos eléctricos en Chile (2025–2050) elaborada en Python a partir de la proyección realizada por (Jiménez, 2024). . . . .	69
7.2	Residuos gestionados de baterías EV por escenario (2025–2060). . . . .	74
7.3	Residuos acumulados de baterías EV gestionadas en Chile (2025–2060). . . . .	75
7.4	Carta Gantt resumida para el sistema de gestión de BFU (2026–2060). . . . .	101
9.1	Carta Gantt de la gestión de baterías fuera de uso (2026–2060). . . . .	137

## Índice de cuadros

5.1	Valor estimado de materiales recuperables según tipo de batería de ion-litio . . . . .	46
7.1	Parámetros generales por escenario . . . . .	71
7.2	Capacidad promedio de batería por categoría y escenario (kWh) . . . . .	72
7.3	Proyección de residuos gestionados en Chile (2025–2030), en toneladas. . . . .	76
7.4	Benchmarking internacional de gestión de baterías de ion-litio . . . . .	84
7.5	Metas SMART propuestas para la implementación del sistema REP de baterías fuera de uso. . . . .	88
7.6	Contramedidas propuestas para la fase <i>Do</i> del ciclo PDCA. . . . .	92
7.7	Indicadores de seguimiento propuestos para la fase <i>Actuar</i> del ciclo PDCA del sistema REP-BFU. . . . .	104
9.1	Proyección anual en toneladas de generación de baterías fuera de uso (BFU) gestionadas en Chile por escenario (2025–2060). . . . .	134

## Índice de ecuaciones

6.1 Asignación de ventas por categoría y uso . . . . .	60
6.2 Fin de vida (desfase por vida útil) . . . . .	60
6.3 Conversión a capacidad energética . . . . .	61
6.4 Conversión a masa . . . . .	61
6.5 Residuos gestionados . . . . .	61
6.6 Resultado agregado por escenario . . . . .	62

## 1. Introducción

El acelerado desarrollo de la electromovilidad ha transformado de manera significativa el panorama energético y ambiental a nivel mundial. En respuesta a esta tendencia, Chile ha adoptado la Estrategia Nacional de Electromovilidad, la cual establece una hoja de ruta para la sustitución progresiva de los vehículos de combustión interna por eléctricos, en coherencia con los compromisos internacionales del país en materia de descarbonización.

Este proceso ha impulsado un crecimiento exponencial en la demanda de baterías de ion-litio, generando a su vez un nuevo desafío, que es asegurar una gestión adecuada de los residuos que se originarán una vez que estas baterías alcancen el fin de su vida útil.

Chile ha establecido compromisos de carbono neutralidad al año 2050 y promueve la electromovilidad a través de estrategias públicas y privadas, aún no se cuenta con un sistema específico que regule la gestión de las baterías fuera de uso (BFU) provenientes del transporte eléctrico. Si bien existe la Ley N.º 20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) establece un marco para la gestión de residuos prioritarios, las baterías de ion-litio aún no han sido incorporadas formalmente, lo que genera una brecha normativa, operativa y tecnológica que podría traducirse en riesgos ambientales y económicos en el mediano plazo.

La magnitud del desafío se hace evidente al proyectar el crecimiento del parque

vehicular eléctrico nacional. De mantenerse las tendencias actuales, Chile podría superar los 1,8 millones de toneladas de BFU acumuladas hacia el año 2060 en el escenario base, y más de 3,6 millones de toneladas en un escenario optimista. Este volumen de residuos implica la necesidad de desarrollar infraestructura de valorización local, sistemas de trazabilidad digital y mecanismos de control que aseguren la recuperación eficiente de materiales críticos como el litio, el níquel y el cobalto, reduciendo la dependencia de tratamientos en el extranjero.

A partir de estos antecedentes, el presente estudio tiene como finalidad proyectar la generación futura de BFU en Chile y diseñar un modelo de gestión integral, incorporando principios de economía circular, mejora continua y trazabilidad digital. Para ello, se propone un enfoque metodológico sustentado en el ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act), que permite estructurar el desarrollo de metas, acciones, controles y mecanismos de retroalimentación de manera secuencial y adaptable.

El modelo propuesto no solo busca anticipar la magnitud del volumen de residuos, sino también ofrecer una estratégica que oriente la toma de decisiones públicas y privadas hacia un sistema nacional de gestión sostenible de baterías fuera de uso. De esta manera, el estudio contribuye a sentar las bases para la implementación de una política de gestión de residuos tecnológicos coherente con los objetivos de transición energética y sostenibilidad ambiental del país.

## 2. Problema de Investigación

En los últimos años, Chile se ha comprometido con la sostenibilidad ambiental, destacando la meta de alcanzar la carbono neutralidad al año 2050. Entre las estrategias que son impulsadas para cumplir este objetivo, se encuentra la transición hacia la electromovilidad que ocupa un rol central, al ser considerada una herramienta clave para reducir las emisiones del sector de transporte, mejorar la calidad del aire y disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados. En 2020, las emisiones nacionales de GEI alcanzaron 105.552 kt CO<sub>2</sub>eq, siendo el sector Energía responsable del 75 % del total, seguido por Agricultura 11 %, Residuos 7 % e IPPU 7 % (Ministerio del Medio Ambiente, 2022a). En línea con esta visión, la Estrategia Nacional de Electromovilidad establece varias metas como que el 100 % de las ventas de vehículos nuevos livianos y medianos correspondan a cero emisiones para el año 2035, junto con la implementación de políticas públicas que promuevan la infraestructura de carga y el desarrollo del mercado local (Ministerio de Energía, 2021).

El contexto internacional refuerza esta tendencia. Según el *Global EV Outlook 2025*, las ventas de vehículos eléctricos han mantenido un crecimiento exponencial, lideradas por China, país que concentra la mayor cuota del mercado global y es uno de los proveedores relevante para América Latina. Esta dinámica también se refleja en Chile, donde el ingreso de modelos de origen chino ha incrementado

la oferta creando una variedad de opciones disponibles para los consumidores (International Energy Agency, 2025).

En el plano nacional, los informes de la Asociación Nacional Automotriz de Chile muestran que las ventas de vehículos eléctricos a batería e híbridos enchufables han aumentado de forma significativa en los últimos años, superando todas las marcas previas en 2024 y 2025. Este crecimiento evidencia un proceso de adopción más acelerado que en años anteriores (Asociación Nacional Automotriz de Chile, 2025). Este suceso se desarrolla en un mercado automotriz históricamente dinámico, donde las ventas de vehículos livianos y medianos han superado en varias ocasiones las 400 mil unidades anuales (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022).

Pese a este avance, la transición tecnológica plantea desafíos críticos que podrían comprometer su sustentabilidad a largo plazo. El más relevante se relaciona con la gestión de las baterías de ion-litio al final de su vida útil. Proyecciones como las del *Taller Final GIZ* estiman que hacia 2035 el volumen de residuos de baterías de vehículos eléctricos crecerá exponencialmente, a pesar de que el país actualmente no disponga de la capacidad instalada necesaria para su reciclaje o para otorgarles una segunda vida útil (GIZ, 2022). Esta falta de infraestructura representa un riesgo ambiental considerable, dado que el manejo inadecuado de

estas baterías puede liberar materiales tóxicos y metales pesados, con potenciales impactos negativos sobre suelos y cuerpos de agua.

En el ámbito normativo, la Ley N.º 20.920 sobre Responsabilidad Extendida del Productor (REP) (Ministerio del Medio Ambiente, 2016) y la Ley N.º 21.505 sobre almacenamiento de energía y electromovilidad (Gobierno de Chile, 2022) establecen bases para un manejo responsable del ciclo de vida de las baterías. Sin embargo, su aplicación específica al sector de vehículos eléctricos sigue estando en una fase temprana y presenta vacíos regulatorios. A esto hay que agregar la ausencia de cadenas logísticas consolidadas para la recuperación, transporte y tratamiento de baterías, así como de incentivos claros para fomentar el desarrollo de una industria local que realice completo el proceso de reciclaje.

En este contexto, el problema central de investigación radica en que, Chile avanza hacia la masificación de vehículos eléctricos como parte de su estrategia de carbono neutralidad, por lo que, se necesita una planificación clara que anticipe el volumen futuro de residuos de baterías y que defina una estrategia para su gestión sostenible. Esta falta de claridad genera interrogantes estratégicas sobre las medidas que debe adoptar el país para enfrentar, de manera oportuna y eficiente, el desafío ambiental y logístico que implicará el fin de vida útil de las baterías, asegurando que la electromovilidad cumpla efectivamente con su promesa de ser

una solución sustentable.

En consecuencia, surgen las preguntas de investigación:

- *¿Cuántos vehículos eléctricos se venderán en Chile entre 2025 a 2050?*
- *¿Cuántas toneladas de baterías fuera de uso (BFU) y residuos asociados se generarán (por año y acumulado)?*
- *¿Qué implicancias estratégicas tendrá esto para un Chile que actualmente no cuenta con capacidad suficiente de segunda vida ni reciclaje?*

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

Analizar la brecha entre la capacidad nacional de gestión de baterías fuera de uso (BFU) de vehículos eléctricos y los requerimientos futuros de la Estrategia Nacional de Electromovilidad, a partir de un modelo predictivo de generación de residuos y del estudio de la infraestructura de valorización, con el fin de identificar los factores críticos que garanticen una transición sostenible hacia la carbono neutralidad en 2050.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

Caracterizar la evolución y el estado actual de la electromovilidad en Chile, mediante el análisis de datos históricos de ventas, el marco de políticas públicas vigentes y los compromisos de la Estrategia Nacional de Electromovilidad.

Proyectar el volumen anual en toneladas, de baterías fuera de uso (BFU) que alcanzarán el final de su vida útil en Chile entre 2026 y 2060, a través de un modelo realizado por Benjamín Jiménez en su memoria (2024) basado en las ventas de vehículos eléctricos.

Analizar la capacidad instalada y el estado de desarrollo del ecosistema de valorización en Chile, incluyendo las infraestructuras de reciclaje y segunda vida, así como el marco regulatorio de la Ley REP aplicable.

Identificar las principales brechas técnicas, logísticas y económicas que existen entre el volumen de residuos proyectado y la capacidad que el marco regulatorio y la industria actual pueden gestionar eficazmente.

Elaborar una propuesta estratégica para el período 2026–2060, basada en el análisis comparativo (*benchmarking*) de experiencias internacionales y en el uso de herramientas de planificación, con el propósito de definir acciones e incentivos que permitan fortalecer la capacidad nacional de valorización de baterías.

## 4. Limitaciones y Alcances

### 4.1. Limitaciones

El presente estudio enfrenta una serie de limitaciones metodológicas y contextuales que deben ser consideradas al interpretar los resultados:

- **Cobertura temporal y de datos:** La proyección de BFU se construye a partir de las estimaciones de (Jiménez, 2024), que entrega una proyección de vehículos eléctricos hasta 2050. No se desarrolla un modelo econométrico propio, por lo que los resultados dependen de los supuestos de esa fuente y de la disponibilidad limitada de datos históricos de ventas de EV en Chile.
- **Vida útil y parámetros técnicos:** Los valores de capacidad promedio de batería (kWh), vida útil y tasa de retorno se basan en literatura internacional y organismos de referencia como la IEA. En Chile no existen aún series empíricas robustas que permitan calibrar estos parámetros, dado que la adopción masiva de vehículos eléctricos es reciente y todavía no hay un volumen significativo de baterías que hayan llegado al fin de su vida útil.
- **Capacidad nacional de gestión:** La información sobre infraestructura de reciclaje y segunda vida en Chile proviene principalmente de reportes institucionales y proyectos piloto. Esto no asegura un panorama completo ni actualizado de la capacidad instalada a nivel nacional.

- **Alcance geográfico:** La proyección se realiza a nivel nacional, sin desagregación territorial. Las diferencias entre regiones en términos de adopción de electromovilidad, infraestructura eléctrica y capacidades de reciclaje no son abordadas en este estudio.
- **Complejidad del sistema actual:** La dinámica de adopción tecnológica y de políticas públicas puede variar en el tiempo. Cualquier cambio en incentivos, precios internacionales de baterías o regulaciones podría modificar sustancialmente los resultados proyectados.

## 4.2. Alcances

El alcance de esta investigación abarca tanto el análisis técnico de la generación futura de baterías fuera de uso (BFU) en Chile como el diseño de un modelo de gestión integral orientado a su valorización y trazabilidad bajo el marco de la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP). El análisis se desarrolla dentro de un horizonte temporal de largo plazo y con un enfoque metodológico de mejora continua estructurado en el ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act).

De manera específica, el estudio considera los siguientes alcances:

- **Horizonte temporal:** Se proyecta la generación de BFU para el período 2026–2060, en relación con las metas nacionales de carbono neutralidad y

los escenarios de penetración de la electromovilidad en Chile.

- **Tipos de vehículos analizados:** Se incluyen vehículos livianos, comerciales, taxis, colectivos, buses y camiones de carga eléctrica, diferenciando su participación en los distintos escenarios de adopción tecnológica.
- **Escenarios de proyección:** Se modelan tres escenarios de crecimiento pesimista, base y optimista, generando trayectorias anuales de generación de residuos en toneladas y permitiendo identificar los periodos de mayor presión sobre la capacidad de valorización nacional.
- **Componentes estratégicos del modelo:** Además de la proyección de cuantificación de residuos, el estudio incorpora la identificación de brechas tecnológicas y normativas, el diseño del sistema de trazabilidad digital (RNB y pasaporte de baterías), y la formulación de metas e indicadores SMART.
- **Dimensión institucional y de gobernanza:** Se definen los actores clave del sistema Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), CORFO, SENCE y sector industrial, estableciendo sus roles y responsabilidades dentro del marco de gestión propuesto.
- **Metodología de análisis:** La modelación se desarrolla mediante herramien-

tas de análisis implementadas en Python, complementadas con una estructura de gestión PDCA que permite evaluar el desempeño del sistema, realizar seguimiento mediante indicadores y proponer acciones de mejora continua.

En conjunto, el estudio no solo entrega una proyección cuantitativa del flujo de BFU, sino que también propone un marco operativo y regulatorio que junta la planificación técnica, la ejecución institucional y el control del desempeño, orientando la construcción de un sistema nacional de gestión sostenible para el período 2026–2060.

## **5. Marco Teórico**

### **5.1. Cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero**

#### **5.1.1. Contexto global y nacional del cambio climático**

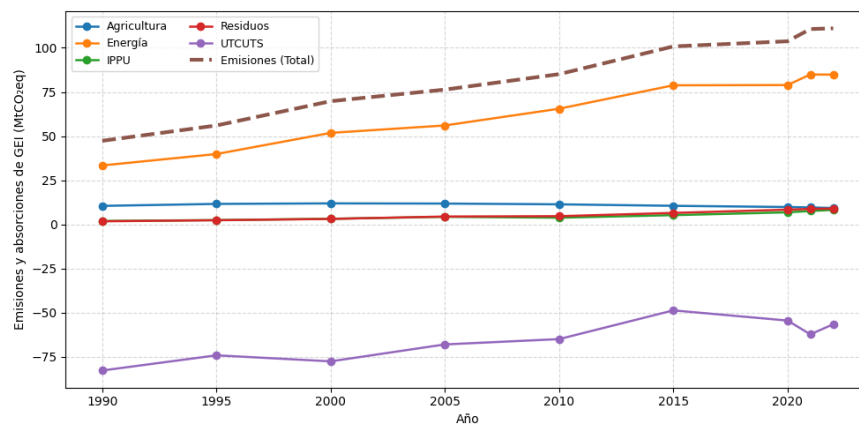
El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales y socioeconómicos del siglo XXI, impulsado principalmente por el aumento sostenido de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI) derivados de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, los procesos industriales, la agricultura y el cambio de uso del suelo. Estos gases, entre los que destacan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), generan un efecto de retención de calor en la atmósfera, contribuyendo al incremento de la temperatura media global.

En el plano internacional, el Acuerdo de París establece compromisos vinculantes para limitar el aumento de la temperatura media global por debajo de 2 °C respecto de niveles preindustriales, con esfuerzos para no superar los 1,5 °C. Chile, como país signatario, ha alineado sus políticas públicas a estos compromisos, integrando metas de mitigación y adaptación que orientan su planificación climática nacional.

### **5.1.2. Situación de Chile y compromisos en reducción de GEI**

En el contexto nacional, el *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2024* elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2024) indica que, para el año 2021, las emisiones totales netas de GEI en Chile alcanzaron aproximadamente 94,2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. El sector energía concentró el 77 % de las emisiones brutas, seguido por agricultura 11 %, procesos industriales y uso de productos 7 % y residuos 5 %. Dentro del sector energía, el transporte terrestre es uno de los principales contribuyentes, responsable de cerca del 25 % de las emisiones nacionales de CO<sub>2</sub>.

La Figura 5.1 presenta la evolución de las emisiones y absorciones de GEI en Chile entre 1990 y 2022, desagregadas por sector. En ella se observa que el sector energía ha mantenido una tendencia exponencial sostenida a lo largo del período, consolidándose como el principal emisor nacional. En contraste, el sector uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS) actúa como sumidero neto, compensando parcialmente las emisiones totales. Esta dinámica evidencia la relevancia del sector energético en la trayectoria nacional de emisiones y refuerza la necesidad de acelerar su descarbonización.



**Figura 5.1:** Emisiones y absorciones de GEI por sector en Chile (1990–2022) (elaboración propia en base a datos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2024 (Ministerio del Medio Ambiente, 2024)).

Para hacer frente a este escenario, Chile ha establecido compromisos internacionales en el marco del Acuerdo de París, los cuales se materializan en su *Contribución Determinada a Nivel Nacional* (NDC, por sus siglas en inglés). El *Anteproyecto de Actualización de la NDC 2025* (Ministerio del Medio Ambiente, 2025) plantea metas reforzadas de reducción de emisiones, estableciendo un presupuesto de emisiones de 1.100 MtCO<sub>2</sub>eq para el período 2020–2030 y comprometiendo el peak de emisiones a más tardar en 2025. Además, refuerza la meta de carbono neutralidad para 2050 y fija objetivos intermedios para los sectores energía y transporte, promoviendo la electromovilidad como estrategia central para la descarbonización.

En este contexto, la transición hacia el uso masivo de vehículos eléctricos se

presenta como una medida clave para reducir las emisiones del sector transporte. Sin embargo, su implementación requiere no solo del despliegue de infraestructura y políticas de incentivo, sino también de una planificación que considere la gestión de los residuos asociados, particularmente las baterías de ion-litio al final de su vida útil.

## **5.2. Electromovilidad como estrategia de descarbonización**

### **5.2.1. Definición y clasificación de vehículos eléctricos**

La electromovilidad comprende un conjunto de tecnologías vehiculares que sustituyen parcial o totalmente el uso de combustibles fósiles por energía eléctrica como fuente de propulsión. De acuerdo con la literatura especializada (International Energy Agency, 2025), se distinguen tres categorías principales:

- **Vehículos eléctricos de batería (BEV, Battery Electric Vehicle):** Funcionan exclusivamente con energía almacenada en baterías recargables desde la red. No poseen motor a combustión y, por ende, no generan emisiones locales.
- **Vehículos híbridos enchufables (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle):** Combinan un motor de combustión interna con uno eléctrico y una

batería recargable. Pueden operar en modo eléctrico en trayectos cortos, pero dependen parcialmente de combustibles fósiles.

- **Vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle):** Utilizan hidrógeno como insumo para producir electricidad a través de una celda de combustible. Sus emisiones directas corresponden únicamente a vapor de agua.

Más allá de la tecnología de propulsión, la electromovilidad también se clasifica por segmento de vehículo, lo cual resulta clave para dimensionar la generación futura de baterías fuera de uso:

- **Vehículos livianos particulares y comerciales:** Incluyen automóviles, SUV y vans de reparto. Constituyen la mayor parte del parque vehicular y, según la Estrategia Nacional de Electromovilidad, deberán alcanzar el 100 % de ventas cero emisiones a partir de 2035.
- **Taxis y colectivos:** Flotas de alta rotación sometidas a un uso intensivo. Por esta razón, las baterías en estos segmentos tienden a presentar una vida útil más corta (4–6 años), lo que implica una generación temprana de residuos.
- **Buses urbanos e interurbanos:** Segmento estratégico para la reducción de emisiones locales. La meta oficial es lograr el 100 % de electrificación de

buses urbanos al 2040.

- **Camiones de carga:** Vehículos medianos y pesados, cuya electrificación es más reciente y enfrenta desafíos tecnológicos. Se proyecta una penetración parcial de BEV y, en paralelo, la incorporación de hidrógeno verde en camiones de más de 5 toneladas hacia 2050.

Esta clasificación dual (tecnológica y por segmento) permite vincular de manera más directa las proyecciones de flota vehicular con la estimación de residuos de baterías, reconociendo que la duración, capacidad y masa de los acumuladores varía significativamente según el tipo de vehículo y su uso operativo.

### **5.2.2. Ventajas y desafíos**

La electromovilidad se plantea como una estrategia fundamental para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales, contribuyendo así a mejorar la calidad del aire y la salud pública. Entre sus principales beneficios se encuentran la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, la mayor eficiencia energética y el potencial de integración con energías renovables en la matriz eléctrica nacional (Ministerio de Energía, 2021). Asimismo, la incorporación de vehículos eléctricos ofrece oportunidades para diversificar la matriz productiva y generar nuevas cadenas de valor en torno al almacenamiento

energético y al reciclaje de baterías.

No obstante, su despliegue enfrenta desafíos significativos. En primer lugar, la autonomía y los tiempos de carga continúan siendo limitantes frente a los vehículos de combustión, a pesar de los avances tecnológicos en baterías. En segundo lugar, el costo inicial de adquisición de vehículos eléctricos sigue siendo más elevado en comparación con los modelos convencionales, lo que restringe su acceso masivo. A estos factores se suman la necesidad de ampliar la infraestructura de carga, los retos de integración con la red eléctrica y la gestión sostenible de las baterías al final de su vida útil (GIZ, 2022).

En síntesis, la electromovilidad combina ventajas ambientales y tecnológicas con desafíos económicos, logísticos y de gestión, lo que obliga a los países a diseñar políticas públicas que equilibren la promoción de este sector con el desarrollo de capacidades locales para enfrentar sus limitaciones estructurales.

### **5.2.3. Evolución global del mercado**

El mercado de vehículos eléctricos ha mostrado un crecimiento acelerado en la última década, impulsado por políticas públicas, avances tecnológicos y cambios en las preferencias de consumo. De acuerdo con el *Global EV Outlook 2025*, China lidera en términos de volumen absoluto de ventas, consolidándose como el

mercado más grande del mundo, mientras que en Europa se observa un desarrollo más heterogéneo.

En el caso de España, la introducción de subsidios e incentivos fiscales generó un aumento sostenido en las ventas de vehículos eléctricos. Sin embargo, cuando estos apoyos fueron reducidos o suspendidos temporalmente, la tasa de crecimiento del mercado se desaceleró significativamente, evidenciando la fuerte dependencia de la demanda a la continuidad de estos instrumentos.

Por contraste, Noruega constituye el ejemplo más destacado a nivel mundial con más del 80 % de los automóviles nuevos vendidos en 2024 fueron eléctricos, resultado de un esquema de incentivos fiscales estable a lo largo del tiempo, junto con una infraestructura de carga altamente desarrollada. La experiencia de Noruega confirma que la consistencia de las políticas públicas es determinante para sostener una alta penetración de electromovilidad en el largo plazo.

En contraste, América Latina presenta una adopción más lenta, con tasas de penetración aún marginales respecto del mercado global. No obstante, países como Chile y Colombia han comenzado a destacar en la región por sus políticas de fomento, incentivos tributarios y marcos regulatorios que buscan acelerar la transición hacia la electromovilidad (Asociación Nacional Automotriz de Chile, 2025).

Este panorama internacional permite identificar tanto las oportunidades como los desafíos para Chile, que debe acelerar el desarrollo de infraestructura, políticas de incentivo y capacidades tecnológicas locales para alcanzar las metas de la Estrategia Nacional de Electromovilidad.

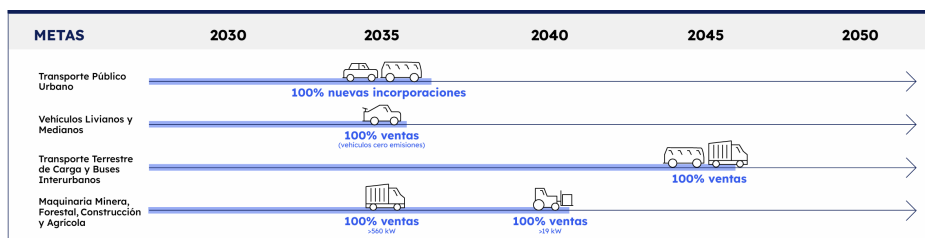
### **5.3. Contexto de la electromovilidad en Chile**

#### **5.3.1. Estrategia Nacional de Electromovilidad**

Chile definió en 2021 una hoja de ruta para acelerar la transición del transporte hacia tecnologías de cero y bajas emisiones. La *Estrategia Nacional de Electromovilidad* establece como meta que el 100 % de las ventas de vehículos livianos y medianos nuevos correspondan a cero emisiones al año 2035, junto con lineamientos para el desarrollo de infraestructura de carga, normas técnicas e instrumentos de fomento para el mercado local (Ministerio de Energía, 2021).

La Figura 5.2 muestra los principales hitos definidos en la Estrategia Nacional de Electromovilidad (Ministerio de Energía, 2021), los cuales establecen un cronograma progresivo de incorporación de tecnologías eléctricas en distintos segmentos del transporte nacional. Entre los objetivos destacan: alcanzar el 100 % de nuevas incorporaciones eléctricas en el transporte público urbano al 2035, el 100 % de ventas de vehículos livianos y medianos al mismo año, la electrificación

completa de camiones de carga hacia 2045, y la inclusión total de buses interurbanos y maquinaria minera, forestal, de construcción y agrícola al 2040. Estas metas configuran un horizonte claro para la descarbonización del transporte y la consolidación de la electromovilidad en Chile.



**Figura 5.2:** Hitos de la Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile (Ministerio de Energía, 2021).

De manera complementaria, la Ley N.º 21.505 promueve el almacenamiento de energía y la electromovilidad, habilitando definiciones y aspectos técnicos para la infraestructura de carga y su operación, y articulándose con los objetivos climáticos del país (Gobierno de Chile, 2022). Asimismo, el marco general de economía circular y gestión de residuos está dado por la Ley N.º 20.920 de *Responsabilidad Extendida del Productor* (REP), que sienta las bases para la gestión de productos al final de su vida útil y orienta la futura regulación específica para baterías de tracción (Ministerio del Medio Ambiente, 2016). En conjunto, estos instrumentos se alinean con los compromisos climáticos nacionales y con la actualización de las metas de mitigación contenidas en la NDC (Ministerio del Medio Ambiente,

2025).

### **5.3.2. Evolución histórica de las ventas de vehículos eléctricos en Chile**

El desarrollo de la electromovilidad en Chile ha sido progresivo y con una marcada diferenciación entre segmentos de vehículos. De acuerdo con estadísticas de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC), las ventas de vehículos livianos y medianos eléctricos comenzaron de forma incipiente en 2011, representando menos del 0,1 % del total de unidades comercializadas. El crecimiento se mantuvo bajo hasta 2018, año en que las ventas comenzaron a incrementarse sostenidamente, alcanzando más de 10.000 unidades acumuladas en 2024.

En el caso de los taxis y colectivos, su incorporación ha sido marginal en la última década, limitada principalmente a programas piloto en Santiago y Valparaíso. Sin embargo, constituyen un segmento de alto interés para la política pública debido a la alta rotación y kilometraje anual que presentan.

Respecto a los buses urbanos, Chile ha sido pionero en América Latina. Desde 2018, la Red Metropolitana de Movilidad (RED) ha incorporado progresivamente flotas de buses eléctricos, alcanzando más de 3.000 unidades en 2025 y consolidando a Santiago como una de las ciudades con mayor flota de transporte público cero emisiones en la región (Red Metropolitana de Movilidad, 2025).

Por su parte, los camiones y vehículos de carga muestran una adopción aún en fase inicial. Las ventas anuales de unidades eléctricas son marginales en comparación al total del segmento, aunque existen experiencias piloto en minería, puertos y distribución urbana, apoyadas por proyectos de hidrógeno verde y fondos de innovación.

Con base a lo analizado, la evolución histórica evidencia un crecimiento acelerado en los segmentos de vehículos livianos y en el transporte público de pasajeros (buses urbanos), mientras que motocicletas, camiones y buses interurbanos aún presentan una participación reducida. No obstante, todos ellos forman parte de las proyecciones oficiales de electromovilidad y, por lo tanto, resultan fundamentales para dimensionar de manera integral la futura generación de baterías fuera de uso en Chile (Ministerio de Energía, 2021).

### **5.3.3. Incentivos y subsidios**

El despliegue de la electromovilidad en Chile ha considerado principalmente instrumentos habilitantes y de fomento no tributario (normas, infraestructura, pilotos y compras públicas), junto con marcos legales que facilitan la expansión de la infraestructura de carga y la integración con el sistema eléctrico (Ministerio de Energía, 2021). A nivel subnacional y sectorial se han implementado programas de

apoyo focalizados (por ejemplo, pilotos para flotas públicas o proyectos cofinanciados), mientras que la experiencia internacional muestra que los subsidios directos a la compra y exenciones fiscales sostenidas inciden de manera significativa en las tasas de adopción (International Energy Agency, 2025).

En Chile, la política pública de fomento a la electromovilidad se ha materializado a través de diversos mecanismos de incentivo económico y tributario. Entre los principales, se destaca la **depreciación acelerada**, establecida en la Resolución Exenta SII N°56 de 2021, que permite aplicar una vida útil de tres años en régimen normal y de un año en régimen acelerado para vehículos eléctricos e híbridos enchufables, beneficio vigente hasta 2031 (Servicio de Impuestos Internos, 2021). Esta medida busca reducir la carga tributaria de las empresas que invierten en electromovilidad, incentivando su adopción.

Por otra parte, el **Programa de Modernización para la Renovación de Taxis Colectivos (RTC)** entrega subsidios directos a la compra de vehículos eléctricos. Para el año 2025, el beneficio asciende a \$9.400.000 CLP por vehículo eléctrico que cumpla con un rendimiento urbano igual o superior a 3 km/kWh, según la Resolución Exenta N°649/2025 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Adicionalmente, en regiones extremas del país se otorga un bono de chatarrización de \$1.700.000 CLP (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2025).

Estos instrumentos se complementan con programas impulsados por CORFO, licitaciones públicas para buses eléctricos y medidas contempladas en la Ley N°21.305 de Eficiencia Energética, conformando un ecosistema de incentivos que, aunque aún limitado en comparación internacional, constituye una base relevante para acelerar la transición hacia un parque vehicular de cero emisiones.

#### **5.3.4. Barreras para la adopción**

Pese al avance de la electromovilidad, persisten barreras estructurales que condicionan su masificación en Chile. En el plano técnico, destacan la autonomía efectiva de los vehículos y los tiempos de recarga bajo condiciones reales de uso, junto con la degradación progresiva de las baterías. En el plano económico, el mayor costo inicial frente a vehículos convencionales y las restricciones de acceso al financiamiento continúan limitando la adopción de nuevas tecnologías. En lo social y cultural, las percepciones de riesgo, la falta de información y la resistencia al cambio de los usuarios constituyen factores adicionales que retrasan la transición. En lo regulatorio, se observan vacíos vinculados a la gestión del fin de vida de las baterías (segunda vida, transporte y reciclaje), así como desafíos para la estandarización de la infraestructura de carga (Ministerio de Energía, 2021).

A estos factores generales se suman limitaciones propias del contexto chileno.

En primer lugar, la infraestructura eléctrica presenta restricciones para absorber un crecimiento acelerado de la demanda, especialmente en regiones alejadas de la zona central. En segundo lugar, existen brechas territoriales en el acceso a la electromovilidad, reflejadas en la concentración de cargadores y flotas en la Región Metropolitana, lo que amplía desigualdades en la transición energética. En tercer lugar, la dependencia de materias primas críticas y de cadenas globales de suministro introduce incertidumbre sobre la disponibilidad y el costo de las baterías. Finalmente, aunque en Chile han surgido iniciativas de reciclaje, la práctica actual centrada en el desensamblaje y la producción de *masa negra* para su exportación no permite un cierre de ciclo completo en el país, lo que genera costos logísticos adicionales y dependencia tecnológica de terceros (López Hernández et al., 2024).

En vista de lo anterior, estas barreras reflejan que el principal desafío no solo radica en la incorporación de vehículos eléctricos, sino también en el desarrollo de un ecosistema nacional capaz de sostener su despliegue. Esto implica avanzar hacia políticas que reduzcan las asimetrías territoriales, fortalezcan la infraestructura de red, aceleren la regulación sobre segunda vida y reciclaje de baterías, y otorguen incentivos de financiamiento que hagan viable la transición a gran escala (Programa Ecomovilidad, 2025).

## **5.4. Tecnología de baterías para vehículos eléctricos**

### **5.4.1. Tipos de baterías**

La batería constituye el componente central en los vehículos eléctricos, ya que determina su autonomía, costo y desempeño general. En la actualidad, la tecnología predominante es la de ion-litio, utilizada en casi el 90 % de los vehículos eléctricos comercializados a nivel mundial (International Energy Agency, 2025). Estas baterías destacan por su elevada densidad energética (200–250 Wh/kg en promedio), su eficiencia en ciclos de carga y descarga y la reducción de su costo por kWh durante la última década. Dentro de la familia de ion-litio existen distintas químicas, tales como NMC (níquel-manganeso-cobalto), NCA (níquel-cobalto-aluminio) y LFP (litio-ferrofosfato), cada una con ventajas diferenciales en términos de costo, estabilidad térmica y vida útil (GIZ, 2022).

En comparación, tecnologías previas como las baterías de plomo-ácido y níquel-metal hidruro (NiMH) presentan menor densidad energética y mayores costos ambientales, por lo que, su uso en electromovilidad se ha reducido drásticamente. Sin embargo, estas alternativas aún son relevantes en aplicaciones de menor exigencia o como sistemas de respaldo.

#### **5.4.2. Ciclo de vida**

El ciclo de vida de una batería de ion-litio abarca cuatro fases principales: (i) producción y ensamblaje de celdas, (ii) etapa de uso en el vehículo, (iii) una segunda vida potencial como sistema de almacenamiento estacionario de energía, y (iv) procesos de reciclaje al final de su vida útil (Ministerio del Medio Ambiente, 2016). La duración promedio de una batería en uso vehicular se estima entre 7 y 10 años, dependiendo de factores como patrones de carga, temperatura ambiental, condiciones de conducción y calidad del sistema de gestión de baterías (BMS). La degradación se manifiesta en la pérdida progresiva de capacidad, lo que reduce la autonomía del vehículo con el tiempo.

En este contexto, resulta relevante destacar que los vehículos sometidos a un uso intensivo como taxis, aplicaciones de transporte por plataformas y flotas de reparto presentan ciclos de carga y descarga mucho más frecuentes que los usuarios particulares. Estudios internacionales muestran que en este tipo de aplicaciones la vida útil de las baterías puede reducirse significativamente, alcanzando entre 4 y 6 años en promedio, debido a la mayor exigencia operativa y al estrés térmico asociado (International Energy Agency, 2025). Este fenómeno anticipa una generación más temprana de baterías fuera de uso en segmentos de alta rotación, lo que repre-

senta tanto un desafío en términos de gestión de residuos como una oportunidad para el desarrollo de programas específicos de segunda vida y reciclaje.

### **5.4.3. Impacto ambiental**

La producción de baterías de ion-litio implica impactos ambientales relevantes, vinculados tanto a la extracción de minerales críticos como a los procesos industriales asociados. En el caso del litio, la explotación en salares del norte de Chile genera tensiones por el uso intensivo de agua en ecosistemas frágiles, donde la recarga hídrica es limitada y la biodiversidad altamente sensible. De manera similar, la extracción de cobalto en países como la República Democrática del Congo ha sido objeto de cuestionamientos por las condiciones laborales y riesgos de vulneración de derechos humanos, lo que evidencia que los impactos trascienden lo estrictamente ambiental y se relacionan también con dimensiones sociales y éticas (International Energy Agency, 2025).

En términos de huella de carbono, la fabricación de baterías es un proceso altamente intensivo en energía. Estudios internacionales estiman que producir una batería de 60 kWh puede generar entre 5 y 8 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que representa una fracción considerable de las emisiones asociadas al ciclo de vida de un vehículo eléctrico. Sin embargo, estas emisiones tienden a compensarse durante

la fase de uso, en la medida en que la electricidad utilizada para la recarga provenga de fuentes renovables (International Energy Agency, 2023). En el caso de Chile, el progresivo aumento de la participación de energías renovables no convencionales en la matriz eléctrica que ya supera el 60 % de la capacidad instalada constituye un factor clave para que la electromovilidad logre efectivamente reducir emisiones netas (Ministerio de Energía, 2021).

Además de los impactos ambientales, las distintas químicas de baterías presentan diferencias relevantes en su valorización económica al final de la vida útil. Según el estudio *Bases para la Economía Circular de Baterías de Ion-Litio en Electromovilidad* (Programa Ecomovilidad, 2025), los valores recuperables de materiales varían significativamente según la composición, como se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Valor estimado de materiales recuperables según tipo de batería de ion-litio

<b>Tipo de batería</b>	<b>Valor estimado (USD/t)</b>
LCO (Óxido de litio y cobalto)	8 418
NMC111 (Níquel–manganeso–cobalto)	4 209
NMC622 (Níquel–manganeso–cobalto)	2 991
NCA (Níquel–cobalto–aluminio)	2 437
LFP (Litio–ferrofosfato)	1 569

*Fuente: Elaboración propia respecto a a los datos de (Programa Ecomovilidad, 2025)*

Como se observa, las baterías de tipo LCO alcanzan los mayores valores de materiales recuperables, seguidas por las químicas NMC y NCA, mientras que las de tipo LFP presentan valorizaciones considerablemente menores. Esta brecha explica parte del interés comercial en el reciclaje de baterías ricas en cobalto y níquel, y evidencia la necesidad de políticas diferenciadas según la composición química para asegurar la viabilidad económica del reciclaje en Chile.

Finalmente, el fin de vida de las baterías plantea un desafío adicional. Si no se gestiona adecuadamente, la disposición inadecuada puede liberar metales pesados, electrolitos y compuestos orgánicos volátiles con efectos nocivos sobre el suelo y las aguas. Por ello, el desarrollo de infraestructura de reciclaje y valorización

local se vuelve esencial para mitigar estos riesgos y avanzar hacia un modelo de economía circular coherente con las metas de carbono neutralidad proyectadas por Chile hacia 2050 (Programa Ecomovilidad, 2025).

## **5.5. Gestión de baterías fuera de uso (BFU)**

### **5.5.1. Segunda vida**

Las baterías fuera de uso (BFU) conservan entre un 70 % y 80 % de su capacidad inicial, lo que las hace aptas para aplicaciones estacionarias antes de su reciclaje final (GIZ, 2022). Sin embargo, un análisis económico aplicado a la agricultura mostró un Valor Actual Neto negativo, aun en el mejor escenario, lo que sugiere la necesidad de subsidios, la disminución de costos o una valoración social de sus beneficios ambientales para que esta reutilización sea viable (Hachim Campos, 2018).

En Chile se han desarrollado diversas iniciativas orientadas a fomentar la reutilización y valorización de baterías fuera de uso (BFU). Una de las más relevantes es el proyecto *LiBR3 (Lithium Battery Reuse, Recycling and Reduction)*, liderado por CircularTec y adjudicado por CORFO en 2025, el cual financia actividades de investigación y desarrollo destinadas a diagnosticar, reacondicionar y evaluar económicamente baterías de vehículos eléctricos para su uso como sistemas de

almacenamiento de energía renovable (CircularTec, 2025; CORFO, 2024). Esta iniciativa busca establecer los fundamentos técnicos y regulatorios necesarios para impulsar una economía circular local en torno a las baterías de ion-litio.

De acuerdo con estimaciones del proyecto *LiBR3* y estudios de la Universidad de Santiago de Chile (USACH, 2024), una batería fuera de uso puede tener un costo equivalente a cerca del 60 % del valor de una nueva y ser reutilizada en aplicaciones estacionarias con capacidades que van desde 2 hasta más de 100 kWh, dependiendo del contexto tecnológico y operativo.

Adicionalmente, existe una línea de investigación en universidades como la UANDES que aplica Inteligencia Artificial para diagnosticar automáticamente el estado de salud (SoH) de baterías usadas, evaluando su potencial para una segunda vida en hogares o comunidades aisladas (Universidad de los Andes, 2025). De manera complementaria, E2Ingeniería desarrolló un sistema modular de almacenamiento energético basado en BFU, aplicable para fines residenciales e industriales, y diseñado para estabilizar la red ante picos de demanda (E2Ingeniería, 2025).

Estos ejemplos muestran que la viabilidad de la segunda vida en Chile está creciendo, aunque persisten retos económicos, técnicos y regulatorios que deberán ser abordados para integrar estos sistemas a gran escala en la transición energética

del país.

### **5.5.2. Reciclaje**

El reciclaje de baterías fuera de uso constituye una fase crítica dentro de la gestión de la electromovilidad, tanto por su impacto ambiental como por el valor estratégico de los materiales recuperados. Los procesos más comunes son la hidrometalurgia, la pirometalurgia y el reciclaje directo, cada uno con distintas eficiencias y costos asociados (GIZ, 2022). Estos métodos permiten recuperar litio, cobalto, níquel y manganeso, minerales críticos para la fabricación de nuevas baterías, cuya disponibilidad a nivel global es cada vez más estratégica.

En términos generales, el reciclaje de una batería de ion-litio comprende cuatro etapas principales (Programa Ecomovilidad, 2025):

1. **Recolección y transporte seguro:** incluye la identificación, almacenamiento y traslado de las baterías fuera de uso bajo condiciones que minimicen riesgos de incendio y contaminación.
2. **Desensamblaje y pretratamiento:** proceso en el que se desmontan módulos y celdas, se neutralizan los electrolitos y se preparan los componentes para el procesamiento químico.

3. **Procesamiento metalúrgico:** puede realizarse mediante *pirometalurgia*, *hidrometalurgia* o reciclaje directo. Su objetivo es recuperar materiales críticos como litio, níquel, cobalto, manganeso y cobre, que se concentran en la llamada *masa negra*.
4. **Refinación y reutilización:** etapa final en la cual los materiales recuperados se transforman en compuestos aptos para la producción de nuevas baterías (p. ej. carbonato de litio, sulfato de cobalto, sulfato de níquel).

En Chile, si bien han surgido iniciativas de reciclaje, el proceso aún no está completamente cerrado. Actualmente, las baterías se someten a una etapa inicial de tratamiento que permite obtener un concentrado intermedio conocido como *masa negra*. Este subproducto, que concentra materiales valiosos pero requiere de procesamiento adicional, debe ser exportado a otros países con capacidades industriales más avanzadas, como Bélgica, Canadá o China, para completar la recuperación (CircularTec, 2025). Esto implica costos adicionales y una dependencia tecnológica que limita la autonomía nacional en la cadena de valor.

Un ejemplo relevante es la empresa Recylink, que ha comenzado a trabajar en el desensamblaje seguro de baterías y en la logística de gestión para generar *masa negra*, mientras que proyectos como LiBR3, adjudicado por CORFO, también consideran el desarrollo de procesos de reciclaje adaptados al contexto chileno

(CORFO, 2024). De acuerdo con estimaciones de la industria, el reciclaje primario en Chile cuesta actualmente entre un 20 % y un 30 % más que en países con plantas consolidadas, principalmente por la falta de economías de escala y de infraestructura especializada (E2Ingeniería, 2025).

En este escenario, la principal barrera es la ausencia de una infraestructura nacional completa de valorización y la necesidad de marcos regulatorios más específicos que faciliten la inversión privada. Chile debe avanzar hacia plantas capaces de cerrar el ciclo de reciclaje de baterías, lo cual permitiría reducir costos, generar empleo especializado y consolidar la transición hacia una economía circular en electromovilidad.

### **5.5.3. Legislación internacional y nacional**

A nivel internacional, los marcos regulatorios han avanzado hacia esquemas de *Responsabilidad Extendida del Productor* (REP), trazabilidad obligatoria y metas de contenido reciclado en baterías. En la Unión Europea, el Reglamento (UE) 2023/1542 establece el pasaporte digital de baterías, metas de recolección, eficiencia mínima de reciclaje y porcentajes obligatorios de contenido reciclado de metales críticos, además de normas de diligencia debida en la cadena de suministro (European Union, 2023).

En Estados Unidos, el Departamento de Energía impulsa tecnologías de reciclaje mediante el ReCell Center (U.S. Department of Energy, ReCell Center, 2025), mientras que la iniciativa Li-Bridge, liderada por Argonne National Laboratory, propone una hoja de ruta con 26 acciones estratégicas para la cadena de suministro de baterías, incluyendo el reciclaje como fuente secundaria de minerales (Argonne National Laboratory, 2023). Este marco se complementa con inversiones públicas que han favorecido la expansión industrial de empresas como Redwood Materials y Li-Cycle, que recibieron préstamos federales por USD 2.000 millones y USD 375 millones respectivamente para aumentar la capacidad instalada de reciclaje (Associated Press, 2023).

En China, el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información (MIIT) ha fortalecido los requisitos de trazabilidad, recuperación mínima y estandarización del desensamblaje de paquetes de baterías, elevando progresivamente las metas de eficiencia y control sobre gestores autorizados (Auto Recycling World, 2023). Estas tendencias internacionales coinciden en asignar al productor la responsabilidad del fin de vida, exigir información estandarizada mediante pasaporte digital y promover incentivos a la segunda vida y al reciclaje.

En Chile, el marco legal se apoya principalmente en la Ley N.º 20.920 (REP), que establece lineamientos generales para la gestión de residuos prioritarios, y

en la Ley N.º 21.505, que fomenta la electromovilidad y el almacenamiento de energía (Gobierno de Chile, 2022). Sin embargo, aún existen vacíos específicos en relación con las baterías, ya que, no se han definido criterios de segunda vida, estándares de reciclaje, ni metas de recolección o valorización obligatorias. En este contexto, la experiencia de la Unión Europea, Estados Unidos y China constituye una referencia útil para cerrar estas brechas y alinear la gestión de BFU con los compromisos climáticos y de economía circular del país (International Energy Agency, 2025).

#### **5.5.4. Capacidades actuales en Chile**

En Chile, la gestión de baterías fuera de uso (BFU) se encuentra en una etapa incipiente y fragmentada, caracterizada principalmente por proyectos piloto y esfuerzos de valorización parcial. Actualmente, las iniciativas de reciclaje permiten únicamente la obtención de “black mass”, la cual se exporta para su refinamiento en el extranjero, reflejando una dependencia tecnológica significativa (Ministerio del Medio Ambiente, 2022b).

El parque nacional de vehículos eléctricos e híbridos enchufables ha crecido sostenidamente en la última década, lo que anticipa la generación de volúmenes crecientes de BFU en los próximos años (Asociación Nacional Automotriz de

Chile, 2025). Diversos actores como Enel X, SQM, CircularTec, universidades y la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático (ASCC) desarrollan proyectos piloto orientados a la valorización y diagnóstico de baterías, aunque aún no existen plantas industriales de reciclaje directo o hidrometalurgia en operación (Programa Ecomovilidad, 2025).

A nivel general, la infraestructura nacional se encuentra en una fase inicial y carece de capacidad industrial consolidada, lo que plantea la necesidad de políticas e inversiones que permitan escalar hacia un sistema de reciclaje integral y autosuficiente.

## **5.6. Modelos y estrategias de planificación**

### **5.6.1. Benchmarking internacional**

El benchmarking internacional permite situar la experiencia chilena en un marco comparativo más amplio. De acuerdo con estudios internacionales (GIZ, 2022), los países que han liderado la electromovilidad han impulsado simultáneamente proyectos de segunda vida, programas de reciclaje y marcos regulatorios específicos para las BFU. Estos antecedentes evidencian que la gestión de baterías se ha convertido en un componente estratégico de la transición energética global.

En el ámbito de la **segunda vida**, el informe de GIZ (2022) identifica múltiples

proyectos piloto de alcance internacional: General Motors y ABB en Estados Unidos con sistemas de almacenamiento de hasta 50 kWh, Nissan–Eaton en Reino Unido con módulos de 4,2 kWh cada uno aplicados a almacenamiento residencial e industrial, Enel en España con aplicaciones en red de 1,7 MWh, y Volvo en Suecia con soluciones de 200 kWh orientadas a energías renovables. Estas iniciativas demuestran la versatilidad de la reutilización de BFU en aplicaciones *off-grid*, *on-grid*, estaciones de carga y micromovilidad.

En el ámbito del **reciclaje**, destacan empresas como Umicore en Bélgica (pirometalurgia e hidrometalurgia), Li-Cycle en Canadá (procesos hidrometalúrgicos con tasas de recuperación cercanas al 95 %) y Redwood Materials en Estados Unidos (sistemas de economía circular en “closed loop”). El estudio de GIZ (2022) señala que la diversidad tecnológica abarca desde la pirometalurgia tradicional hasta innovaciones en reciclaje directo, lo que refleja la búsqueda global por maximizar la recuperación de litio, níquel y cobalto.

Un aspecto transversal del benchmarking es el rol de los esquemas de **Responsabilidad Extendida del Productor (REP)**. Según el informe de GIZ (2022), a nivel internacional los REP se han consolidado como instrumentos clave para asegurar la recolección eficiente, fomentar la segunda vida y expandir la capacidad de reciclaje. No obstante, aún persisten vacíos regulatorios sobre la responsabilidad

de las baterías que atraviesan una segunda vida antes de su reciclaje final.

En vista de lo anterior, la evidencia internacional muestra tres tendencias convergentes, como lo es la expansión de proyectos de segunda vida, la instalación de plantas de reciclaje con altas tasas de recuperación y la adopción de esquemas REP como política pública central. Aun con diferencias regionales, existe consenso en que la gestión eficiente de las BFU es un componente estructural de la transición hacia una electromovilidad sostenible.

## **6. Metodología**

La metodología de esta investigación se estructura a partir de un enfoque mixto que integra la modelación cuantitativa del flujo futuro de baterías fuera de uso (BFU) con un marco de gestión basado en el ciclo PDCA. Este diseño metodológico permite proyectar el comportamiento del sistema y, simultáneamente, definir una hoja de ruta para su implementación gradual. El esquema se organiza en cuatro componentes: (i) selección y procesamiento de la fuente de proyecciones, (ii) definición de parámetros y variables del modelo, (iii) formulación matemática para la estimación del volumen de BFU y (iv) aplicación del ciclo PDCA para orientar la planificación, ejecución, verificación y mejora continua del sistema de gestión.

### **6.1. Fuente principal de proyecciones**

El modelo de proyección se construye a partir de las estimaciones desarrolladas en la memoria de (Jiménez, 2024), que presentan la evolución del parque vehicular en Chile hasta 2050. Dichas proyecciones, alineadas con la Estrategia Nacional de Electromovilidad, abarcan vehículos livianos y comerciales, taxis y colectivos, buses urbanos y camiones de carga. Este insumo se utiliza de manera directa, sin estimación econométrica adicional sobre participación de mercado.

## 6.2. Formulación matemática del modelo

### Conjuntos

- $U = \{\text{conv, rh}\}$ : conjunto de usos, que distingue entre vehículos de uso convencional (conv) y de ride-hailing (rh).
- $S = \{\text{OPT, BASE, PES}\}$ : conjunto de escenarios, correspondientes al caso optimista, base y pesimista.
- $T = \{2026, \dots, 2060\}$ : conjunto de años de análisis de la proyección.
- $C = \{\text{MOT, VLP, VLC, CAM LIV, CAM MED, CAM PES, BUS RIG, BUS ART, BUS INT PROV, TAX}\}$ : conjunto de categorías de vehículos eléctricos, donde MOT corresponde a motocicletas eléctricas, VLP a vehículos livianos de pasajeros, VLC a vehículos livianos comerciales, CAM LIV a camiones livianos, CAM MED a camiones medianos, CAM PES a camiones pesados, BUS RIG a buses rígidos urbanos, BUS ART a buses articulados, BUS INT PROV a buses interprovinciales y TAX a taxis/colectivos.

## Parámetros

- $EV_{c,s}(t)$ : ventas totales de vehículos eléctricos de categoría  $c$  en el año  $t$  bajo el escenario  $s$ , obtenidas de Jiménez (2024).
- $\omega_{u,s}(t)$ : proporción de ventas del año  $t$  correspondientes al uso  $u$  bajo el escenario  $s$ .
- $L_{u,s}$ : vida útil media de la batería (años) en el uso  $u$  bajo el escenario  $s$ .
- $kWh_{c,s}$ : capacidad promedio de batería (kWh) de la categoría  $c$  bajo el escenario  $s$ .
- $\rho$ : factor de conversión de capacidad a masa, con  $\rho = 6,5$  kg/kWh.
- $\tau_s$ : tasa de retorno efectiva de las baterías en el escenario  $s$ , que refleja el porcentaje de baterías gestionadas en sistemas formales.

## Variables

- $EV_{c,u,s}(t)$ : ventas de vehículos eléctricos de categoría  $c$ , asignadas al uso  $u$ , en el año  $t$  y escenario  $s$ .
- $EoL_{c,u,s}^{\text{veh}}(t)$ : vehículos eléctricos de categoría  $c$  en fin de vida en el año  $t$ , provenientes del uso  $u$  y escenario  $s$ .

- $EoL_{c,u,s}^{kWh}(t)$ : capacidad energética (kWh) de baterías en fin de vida en el año  $t$ , por categoría  $c$ , uso  $u$  y escenario  $s$ .
- $EoL_{c,u,s}^{ton}(t)$ : masa total de baterías en fin de vida en el año  $t$  (toneladas), por categoría  $c$ , uso  $u$  y escenario  $s$ .
- $Residuos_{c,u,s}^{ton,gest}(t)$ : residuos de baterías gestionados en el año  $t$  (toneladas), por categoría  $c$ , uso  $u$  y escenario  $s$ .

### Ecuaciones del modelo

#### 1. Asignación de ventas por categoría y uso:

$$EV_{c,u,s}(t) = \omega_{u,s}(t) \cdot EV_{c,s}(t), \quad \forall c \in C, u \in U, s \in S, t \in T. \quad (6.1)$$

#### 2. Fin de vida (desfase por vida útil):

$$EoL_{c,u,s}^{veh}(t) = \begin{cases} EV_{c,u,s}(\theta), & \text{si } t = \theta + L_{u,s}, \theta \in T, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (6.2)$$

donde  $\forall c \in C, u \in U, s \in S, t \in T$ .

**3. Conversión a capacidad energética:**

$$EoL_{c,u,s}^{\text{kWh}}(t) = EoL_{c,u,s}^{\text{veh}}(t) \cdot kWh_{c,s}, \quad \forall c \in C, u \in U, s \in S, t \in T. \quad (6.3)$$

**4. Conversión a masa:**

$$EoL_{c,u,s}^{\text{ton}}(t) = \frac{EoL_{c,u,s}^{\text{kWh}}(t) \cdot \rho}{1000}, \quad \forall c \in C, u \in U, s \in S, t \in T. \quad (6.4)$$

**5. Residuos gestionados:**

$$\text{Residuos}_{c,u,s}^{\text{ton,gest}}(t) = EoL_{c,u,s}^{\text{ton}}(t) \cdot \tau_s, \quad \forall c \in C, u \in U, s \in S, t \in T. \quad (6.5)$$

**6. Resultado agregado por escenario:**

$$\text{Residuos}_s^{\text{ton,gest}}(t) = \sum_{c \in C} \sum_{u \in U} \text{Residuos}_{c,u,s}^{\text{ton,gest}}(t), \quad \forall s \in S, t \in T. \quad (6.6)$$

De este modo, a partir de las proyecciones de ventas de vehículos eléctricos por categoría se obtienen trayectorias anuales de residuos de baterías bajo distintos escenarios y usos, permitiendo capturar tanto la heterogeneidad tecnológica como las diferencias en políticas de retorno.

### **6.3. Implementación computacional en Python**

El modelo definido mediante conjuntos, parámetros y variables se implementa íntegramente en Python, siguiendo la formulación matemática anterior. La lógica corresponde a un esquema determinista de cohortes, donde cada venta anual de vehículos eléctricos se desplaza en el tiempo según la vida útil de la batería, generando flujos de fin de vida en los años posteriores.

La implementación utiliza `pandas DataFrames` para estructurar los insumos, que incluyen las ventas proyectadas por categoría de vehículo ( $C$ ), los escenarios de análisis ( $S$ ) y los parámetros técnicos asociados ( $kWh_{c,s}$ ,  $L_{u,s}$ ,  $\rho$ ,  $\tau_s$ ). Las ecuaciones del modelo se aplican de manera vectorizada, lo que permite convertir desde ventas de vehículos eléctricos a capacidad energética, luego a masa y finalmente a residuos gestionados de forma eficiente. Los resultados se exportan automáticamente a tablas en formato Excel y a gráficos comparativos que ilustran tanto las

trayectorias anuales como los acumulados.

Si bien el insumo inicial de flota proviene de Jiménez (2024), la proyección de residuos de baterías constituye un desarrollo propio en Python, lo que asegura reproducibilidad, transparencia en los supuestos y flexibilidad para actualizar los escenarios con nuevos datos. Además, la estructura modular del código permite realizar análisis de sensibilidad sobre la vida útil, la tasa de retorno o la capacidad promedio de las baterías por categoría, ampliando la utilidad del modelo como herramienta de apoyo a la planificación estratégica.

#### **6.4. Metodología basada en el ciclo PDCA**

El ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) es una herramienta de mejora continua utilizada para abordar problemas de forma estructurada, permitiendo planificar, ejecutar, verificar y actuar sobre los resultados obtenidos. Este método se utiliza en la investigación para representar cómo se deben gestionar las BFU en Chile dentro de un enfoque sistemático y progresivo.

El PDCA se compone de cuatro etapas principales:

#### 6.4.1. Plan (Planificar)

Corresponde a la fase donde se identifica el problema y se analizan sus causas. Su propósito es comprender la situación actual y definir las metas que se buscan alcanzar. En esta etapa se desarrollan los siguientes pasos:

- **Problema:** definir con claridad la situación que requiere ser mejorada o controlada.
- **Observación:** recopilar datos y antecedentes relevantes sobre la situación actual.
- **Análisis:** identificar las causas raíz del problema mediante diferentes herramientas. En este caso se utilizará el *método de los 5 Porqués*, una técnica desarrollada por Sakichi Toyoda y ampliamente aplicada en el sistema de producción de Toyota, que permite indagar de manera sistemática en las causas de un problema.

El método consiste en formular de manera iterativa la pregunta “¿por qué?” cada vez que se obtiene una causa, hasta llegar a la causa raíz que origina el problema. Generalmente, con cinco iteraciones es posible identificar el origen real de la situación observada. Este enfoque favorece la comprensión

profunda del problema, evita soluciones superficiales y orienta la definición de contramedidas efectivas.

- **Objetivo:** establecer un resultado esperado concreto, medible y alcanzable, alineado con las metas del sistema de gestión.

#### **6.4.2. Do (Hacer)**

Corresponde a la fase de ejecución del ciclo, en la cual se llevan a cabo las acciones planificadas durante la etapa anterior. En este trabajo, se implementan las contramedidas definidas a partir del análisis de causas raíz.

Estas contramedidas representan las acciones concretas orientadas a atacar la causa raíz identificada. Durante esta etapa se aplican, supervisan y documentan todas las actividades desarrolladas, asegurando la trazabilidad de los resultados y el cumplimiento de los plazos establecidos. Además, se registran las observaciones, dificultades y ajustes realizados, con el fin de disponer de evidencia para la siguiente fase de verificación (*Check*).

#### **6.4.3. Check (Verificar)**

Consiste en comparar los resultados obtenidos con los objetivos establecidos en la fase de planificación. En esta etapa se analizan los datos recolectados para

determinar si las acciones ejecutadas fueron efectivas y si los indicadores muestran una mejora respecto a la situación inicial.

Para facilitar esta evaluación, se utiliza una **carta Gantt** como herramienta de apoyo, ya que permite visualizar el avance de las actividades, los hitos cumplidos y los desvíos respecto a lo planificado. Esta representación temporal entrega una visión clara del grado de cumplimiento de cada contramedida, facilitando la detección de retrasos o brechas en la ejecución.

La verificación mediante la carta Gantt, junto con el análisis de los indicadores de desempeño, permite validar o ajustar las hipótesis planteadas en la fase de planificación, sirviendo de base para la toma de decisiones en la etapa siguiente (*Act*).

#### **6.4.4. Act (Actuar)**

En esta última etapa se estandarizan las mejoras que resultaron exitosas y se corrigen las desviaciones detectadas. Si las acciones implementadas cumplen los objetivos, se formalizan mediante procedimientos, lineamientos o políticas que aseguren su continuidad. En caso contrario, se redefinen las causas del problema y se inicia un nuevo ciclo PDCA, promoviendo así la mejora continua del sistema de gestión.

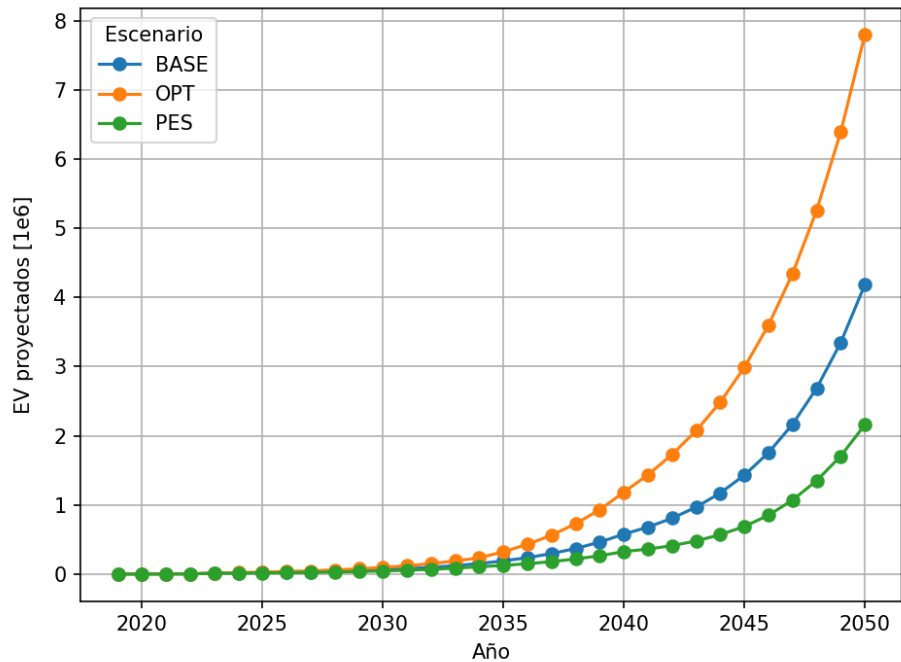
Como parte de esta fase, se plantean los indicadores de seguimiento que permitirán monitorear de forma permanente la efectividad de las acciones en el tiempo. Estos indicadores se orientan a garantizar que el proceso continúe ejecutándose de manera sostenible y coherente, asegurando la evaluación de resultados y la adaptación del sistema ante nuevos desafíos o cambios regulatorios.

El ciclo PDCA constituye una metodología iterativa que facilita el aprendizaje organizacional y la toma de decisiones basada en evidencia. Aplicar este enfoque en la gestión de BFU permite establecer un sistema que aprende de su desempeño, corrige desvíos y consolida prácticas sostenibles en el tiempo.

## 7. Desarrollo y Análisis

En la Figura 7.1 esta representada la proyección del parque de vehículos eléctricos (EV) en Chile hasta 2050, elaborada a partir de las estimaciones de Jiménez (2024). Se consideran tres escenarios: pesimista (PES), base (BASE) y optimista (OPT). En todos los casos, la penetración es reducida en la década 2020–2030, pero a partir de 2035 se observa un crecimiento exponencial marcado, coherente con la meta establecida en la Estrategia Nacional de Electromovilidad que plantea el 100 % de ventas para los vehículos medianos y livianos cero emisiones en ese año.

Las diferencias entre escenarios se vuelven significativas en el año 2050, el escenario pesimista alcanza aproximadamente 2,1 millones de EV, el escenario base en torno a 4,2 millones, y el optimista sobrepasa los 7 millones. Esta diferencia evidencia la sensibilidad de los resultados respecto a los supuestos planteados de penetración tecnológica y de política pública.



**Figura 7.1:** Proyección del parque de vehículos eléctricos en Chile (2025–2050) elaborada en Python a partir de la proyección realizada por (Jiménez, 2024).

### 7.1. Supuestos

Un aspecto clave para transformar las proyecciones de vehículos eléctricos en toneladas de residuos de baterías corresponde a la definición de parámetros técnicos. La masa de una batería no se mide directamente en toneladas, sino en términos de su capacidad energética ( $kWh$ ). Para realizar esta conversión, se propone un factor de densidad energética  $\rho$ , fijado en  $6,5 \text{ kg/kWh}$ , valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura internacional sobre baterías

automotrices, que varía entre 160 y 250 Wh/kg (International Energy Agency, 2025). Este supuesto permite convertir la capacidad energética instalada en cada vehículo en un peso físico, que en este caso será en toneladas.

En segundo lugar, no todas las baterías que llegan al fin de su vida útil van a ingresar a los sistemas formales de reciclaje o segunda vida. Un porcentaje de ellas pueden quedar en talleres, ser desviadas a mercados informales o simplemente no ser recuperada. Para reflejar esta realidad, se incorpora una tasa de retorno o gestión, representada por  $\tau$ , cuyo rango varía entre 0,80 y 0,90 según el escenario. Este parámetro permite estimar qué fracción de las toneladas efectivamente será procesada en circuitos formales de reciclaje.

Asimismo, la vida útil promedio de las baterías depende del tipo de uso. En el caso de los vehículos particulares se asume una duración de  $L_{\text{conv}}$  entre 9 y 11 años, mientras que para los vehículos destinados a servicios de ride-hailing ( $L_{\text{rh}}$ ) se considera una vida útil menor, entre 6 y 8 años, debido a que, se enfrentan a mayores ciclos de carga. Por otra parte, la proporción de vehículos destinados a ride-hailing, representada por  $\omega_{\text{rh}}(t)$ , varía según el escenario analizado: creciente en el optimista (5 %  $\rightarrow$  10 %), constante en el base (6 %) y decreciente en el pesimista (5 %  $\rightarrow$  4 %).

Todos estos parámetros generales se resumen en la Tabla 7.1, la cual presenta

los valores adoptados para cada escenario considerado en el modelo.

**Tabla 7.1:** Parámetros generales por escenario

<b>Parámetro</b>	<b>OPT</b>	<b>BASE</b>	<b>PES</b>
$L_{\text{conv}}$ (años)	11	10	9
$L_{\text{rh}}$ (años)	8	7	6
$\tau$	0.90	0.85	0.80
$\omega_{\text{rh}}(t)$	creciente (5 %→10 %)	estable (6 %)	decreciente (5 %→4 %)
$\rho$ (kg/kWh)	6.5		

*Fuente: Elaboración propia.*

Adicionalmente, dado que el tamaño de la batería difiere significativamente entre categorías de vehículos, se incorpora un parámetro  $kWh_{s,c}$  que representa la capacidad promedio de batería de la categoría  $c$  bajo cada escenario, esta clasificación de categorías se obtiene desde la proyección de Jimenez de los VE. Esta diferenciación es relevante, ya que un bus interprovincial puede tener una batería de 750–825 kWh, mientras que una motocicleta eléctrica rara vez supera los 5–6 kWh. La Tabla 7.2 resume los valores adoptados para cada tipo de vehículo, mostrando la variación de la capacidad promedio de batería según el escenario.

**Tabla 7.2:** Capacidad promedio de batería por categoría y escenario (kWh)

<b>Categoría</b>	<b>OPT</b>	<b>BASE</b>	<b>PES</b>
MOT	5.5	5	4.5
TAX	77	70	63
VLP	66	60	54
VLC	80	72	65
CAM LIV	82.5	75	67.5
CAM MED	242	220	198
CAM PES	660	600	540
BUS RIG	352	320	288
BUS ART	550	500	450
BUS INT PROV	825	750	675

*Fuente: Elaboración propia.*

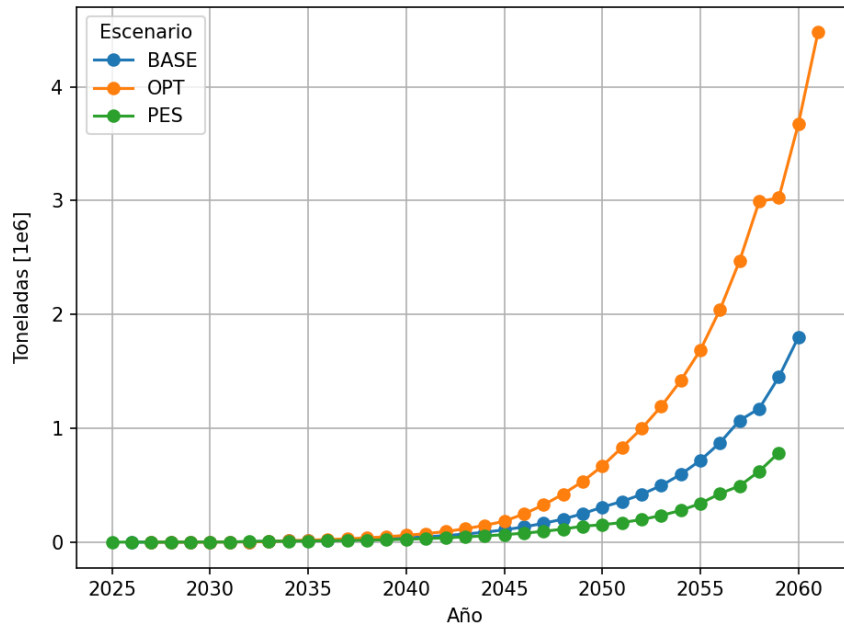
La inclusión de esta desagregación por categoría, mostrada en la Tabla 7.2, permite capturar la heterogeneidad en el tamaño de las baterías y, en consecuencia, la magnitud de los residuos proyectados bajo cada escenario.

## **7.2. Resultados cuantitativos**

### **7.2.1. Estimación de generación de BFU (2026–2060)**

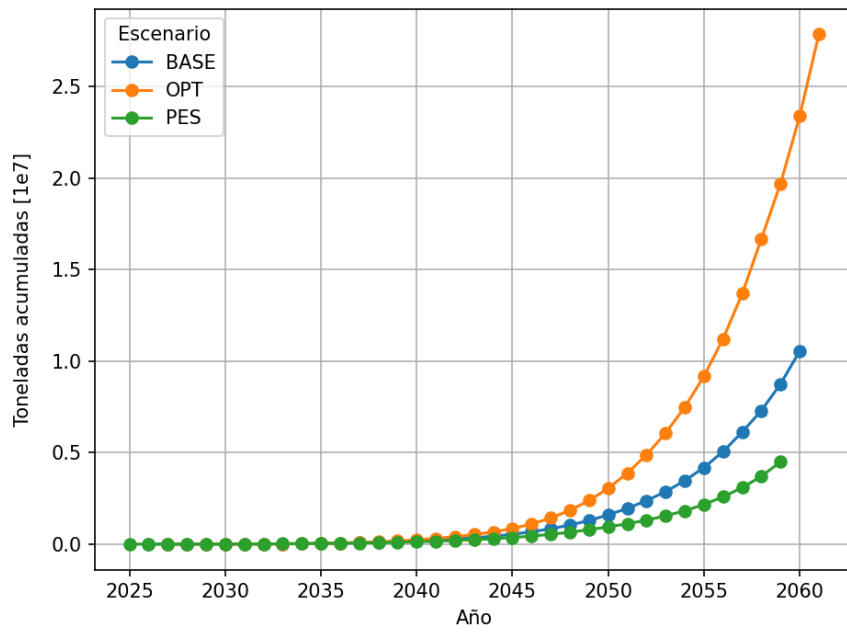
La Figura 7.2 presenta los volúmenes anuales de BFU gestionadas en Chile bajo los tres escenarios proyectados: PES, BASE y OPT. Se observa que los valores iniciales son marginales en la década 2020–2030, pero a partir de 2045 la trayectoria se incrementa exponencialmente, alcanzando en el escenario optimista valores cercanos a 3 millones de toneladas anuales hacia 2059, mientras que el escenario base 1,4 millones y el pesimista 785 mil toneladas. También, ocurre una variación significativa en cada uno de los escenarios respecto a los supuestos planteados.

En contraste, el escenario pesimista muestra un crecimiento más moderado, alcanzando 1187,6 toneladas en 2030, mientras que el escenario base alcanza 1263,5 toneladas y el optimista 985,7 toneladas en ese mismo año, lo que indica que al principio no hay una diferencia significativa por escenario.



**Figura 7.2:** Residuos gestionados de baterías EV por escenario (2025–2060).

Además, en la Figura 7.3 se representa el volúmen acumulado de BFU gestionadas durante el período 2025–2060. El crecimiento presenta un comportamiento exponencial, en 2030 los volúmenes totales acumulados aún se mantienen por debajo de las mil toneladas, pero hacia 2050 superan varios millones en el escenario optimista. Este desfase temporal entre la incorporación de vehículos eléctricos y la generación de BFU refleja la influencia de la vida útil de las baterías en la dinámica de residuos.



**Figura 7.3:** Residuos acumulados de baterías EV gestionadas en Chile (2025–2060).

**Tabla 7.3:** Proyección de residuos gestionados en Chile (2025–2030), en toneladas.

<b>Año</b>	<b>Escenario PES (ton)</b>	<b>Escenario BASE (ton)</b>	<b>Escenario OPT (ton)</b>
2025	25.9	–	–
2026	29.1	39.8	–
2027	43.4	48.3	44.7
2028	547.1	74.4	60.1
2029	868.0	723.8	96.6
2030	1187.6	1263.5	985.7

*Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de proyección desarrollado en Python.*

La Tabla 7.3 resume la proyección de generación anual de BFU entre 2025 y 2030. Como se mencionó anteriormente al analizar la figura 7.2, los volúmenes iniciales son bajos, especialmente en los escenarios BASE y OPT, donde los primeros residuos aparecen entre 2026 y 2027. En contraste, el escenario PES presenta residuos desde 2025, alcanzando 547,1 toneladas en 2028 y 1187,6 toneladas en 2030. Para ese mismo año, los valores en el escenario BASE y OPT ascienden a 1263,5 y 985,7 toneladas, respectivamente. Estas cifras evidencian una brecha creciente entre escenarios, que se amplía significativamente hacia mediados de siglo.

### 7.2.2. Comparación de escenarios y metas proyectadas

El análisis de los tres escenarios permite identificar distintas trayectorias de crecimiento en la generación de BFU. El **escenario pesimista** presenta una expansión moderada, donde las toneladas gestionadas aumentan lentamente hasta el año 2050, reflejando un avance paulatino de la electromovilidad y capacidades limitadas de reciclaje. El **escenario base** muestra un desarrollo sostenido y equilibrado, en el cual Chile logra instalar progresivamente infraestructura de reciclaje y sistemas de segunda vida. Finalmente, el **escenario optimista** plantea una expansión acelerada del parque eléctrico, por lo tanto, una generación temprana y masiva de residuos, con desafíos logísticos y tecnológicos significativos.

Las metas estratégicas comunes a los tres escenarios apuntan a un desarrollo escalonado de capacidades nacionales de gestión y valorización de baterías:

- **2026–2030:** Implementar al menos una planta piloto de reciclaje con capacidad inicial entre **5.000 y 10.000 toneladas anuales**, junto con programas de recolección y manejo seguro de BFU.
- **2030–2040:** Escalar la capacidad industrial nacional a **20.000–40.000 toneladas anuales**, integrando procesos de reciclaje mecánico e hidrometalúrgico y fomentando aplicaciones de segunda vida.

- **2040–2050:** Desarrollar infraestructura de gran escala, alcanzando entre **60.000 y 100.000 toneladas anuales**, con sistemas de reutilización que cubran hasta un 45 % de las BFU generadas.
- **2050–2060:** Consolidar un sistema circular completo, con **más de 100.000 toneladas anuales de capacidad instalada** y una recuperación superior al 90 % de materiales críticos.

Estas metas constituyen una planificación estratégica común para los tres escenarios, permitiendo dimensionar las brechas y capacidades requeridas según la magnitud proyectada de BFU. En todos los casos, los resultados confirman la urgencia de planificar de manera temprana la infraestructura y regulación necesaria para gestionar de forma sostenible el aumento esperado de BFU en el país.

Cabe destacar que la Tabla 9.1, incluida en el Anexo 9.1, presenta el detalle de la proyección anual de BFU generadas bajo cada escenario desde el año 2026-2060, lo cual permite sustentar cuantitativamente las metas progresivas propuestas para el desarrollo de capacidades nacionales de reciclaje.

### **7.3. Análisis estratégico**

#### **7.3.1. Comparación con la capacidad nacional instalada**

La comparación entre los volúmenes proyectados de BFU y la capacidad nacional instalada revela una brecha significativa. Los resultados de este modelo muestran que hacia 2030 se generarán en Chile más de 1.000 toneladas anuales de residuos de baterías en el escenario base, cifra que se eleva a decenas de miles de toneladas anuales durante la década de 2040. Estos valores ilustran el crecimiento exponencial de los flujos de residuos asociados a la electromovilidad.

Por otro lado, la capacidad de reciclaje actualmente en el país es prácticamente nula en términos industriales. Existen actores privados como Ecovalor y Recylink que ofrecen servicios de retiro, almacenamiento y pretratamiento de baterías de ion-litio, así como proyectos piloto de investigación y desarrollo impulsados por CircularTec (LiBR3), E2Ingeniería y universidades como la USACH y la UANDES. Sin embargo, ninguna de estas iniciativas reporta públicamente su capacidad instalada en toneladas procesadas por año, lo que dificulta dimensionar el alcance real que tiene actualmente el país.

La falta de cifras oficiales de capacidad instalada constituye un hallazgo relevante, ya que, mientras el volumen de residuos crece de manera cuantificable, la

infraestructura nacional carece de métricas claras y verificables.

### **7.3.2. Brechas identificadas**

El análisis de la capacidad nacional frente a los volúmenes proyectados de BFU permite identificar brechas de carácter técnico, económico y regulatorio. Estas brechas reflejan la distancia entre la situación actual en Chile y los requerimientos futuros que se necesitan para gestionar adecuadamente los residuos generados por la electromovilidad.

#### **Brechas técnicas**

En el plano técnico, Chile no cuenta con infraestructura de reciclaje a escala industrial. Las iniciativas actuales sólo permiten llegar a la etapa de pretratamiento y obtención de *black mass*, que posteriormente se exporta para su refinamiento en el extranjero. Esto refleja la ausencia de plantas hidrometalúrgicas o de reciclaje directo capaces de recuperar litio, cobalto, níquel y manganeso en el país (Programa Ecomovilidad, 2025). A ello se suma la dificultad de estandarizar procesos de desensamblaje, la heterogeneidad en los diseños de baterías y la complejidad de diagnosticar su estado de salud (SOH), que son elementos destacados por estudios internacionales como GIZ (2022).

## **Brechas económicas**

Desde la perspectiva económica, los altos costos de inversión inicial en plantas de reciclaje constituyen una barrera crítica. Según Programa Ecomovilidad (2025), los procesos hidrometalúrgicos y de reciclaje directo requieren economías de escala para ser rentables, lo que contrasta con el volumen aún reducido de BFU en el país hacia 2030. La ausencia de mecanismos de financiamiento e incentivos estables limita la entrada de inversionistas privados, aumentando el riesgo de que Chile permanezca en una posición de dependencia tecnológica, exportando únicamente *black mass* sin capturar el valor agregado de los materiales críticos. La experiencia internacional refuerza esta brecha, por ejemplo, en Estados Unidos, el Departamento de Energía ha otorgado préstamos de miles de millones de dólares para proyectos de reciclaje como Redwood Materials y Li-Cycle, mostrando la magnitud del apoyo necesario para escalar estas tecnologías.

## **Brechas regulatorias**

En el ámbito regulatorio, Chile cuenta con normativas generales que pueden aplicarse en un futuro a las baterías de ion-litio, pero carece de un marco integral y específico para la electromovilidad. La Ley REP (Ley N.º 20.920) establece la Responsabilidad Extendida del Productor, pero aún no define metas obligatorias

para las baterías de vehículos eléctricos. Por otra parte, el DS N.º 148/2003 del Ministerio de Salud regula el almacenamiento de residuos peligrosos, mientras que el DS N.º 298 y su actualización DS N.º 40/2022 establecen condiciones para el transporte de sustancias peligrosas, incluyendo las BFU. Finalmente, el *Reglamento que regula el movimiento transfronterizo de residuos* habilita la exportación de masa negra o baterías usadas hacia mercados internacionales (Ministerio del Medio Ambiente, 2022b).

A pesar de estas normativas en el país, no existen leyes específicas que regulen la trazabilidad, el pasaporte digital de baterías, la certificación de segunda vida ni metas de recolección obligatorias para electromovilidad. En cambio, la Unión Europea ha avanzado en estas materias mediante el Reglamento (UE) 2023/1542 (European Union, 2023), que incorpora exigencias vinculantes de reciclaje y contenido mínimo de material recuperado. Esta brecha normativa limita el desarrollo de un mercado formal y sostenible para la gestión de BFU en el país.

Estas brechas mencionadas, revelan que la capacidad actual de Chile está por debajo de los volúmenes proyectados de BFU. Mientras que hacia 2030 se estiman del orden de mil toneladas anuales, en la década de 2040 la generación superará las decenas de miles de toneladas por año. Sin una infraestructura industrial adecuada, mecanismos de financiamiento e incentivos, y un marco regulatorio adaptado a

las particularidades de las baterías de ion-litio, el país no estará preparado para enfrentar este desafío. La identificación de estas brechas justifica la necesidad de una planificación estratégica que permita desarrollar capacidades progresivas en reciclaje, segunda vida y regulación, como se plantea en el capítulo siguiente.

### **Comparación internacional de referencia**

En función de las etapas descritas, la Tabla 7.4 sintetiza los resultados del benchmarking internacional realizado. Este análisis compara la situación actual de Chile con dos referentes estratégicos que es la Unión Europea y China a partir de dimensiones normativas, técnicas y de trazabilidad.

**Tabla 7.4:** Benchmarking internacional de gestión de baterías de ion-litio

Dimensión	Chile	Unión Europea	China
Normativa REP	No existe REP específica para baterías de electromovilidad (solo Ley REP general).	Reglamento 2023/1542 establece REP y requisitos específicos.	REP obligatoria desde 2016 para fabricantes y recicladores.
Metas de recolección	No hay metas oficiales definidas.	63 % al 2027, 73 % al 2030.	Pilotos urbanos reportan más del 70 % de recuperación.
Trazabilidad	No hay registro ni pasaporte digital.	Pasaporte digital obligatorio desde 2027.	Sistema de trazabilidad digital con código QR desde 2018.
Segunda vida	Solo pilotos aislados.	Proyectos de almacenamiento estacionario (Nissan-Eaton, ABB-GM).	Integración en sistemas de energía renovable a gran escala.
Reciclaje	Sin plantas industriales (solo investigación piloto).	Hidrometalurgia, pirometalurgia y procesos mecánicos en operación industrial.	Ecosistema completo con más de 50 plantas de reciclaje.
Contenido reciclado	No regulado.	Obligatorio: 16 % Co, 6 % Li, 6 % Ni, 85 % Pb en 2030.	Exigencias de recuperación altas, sin metas porcentuales públicas.
Capacidad instalada	0 plantas industriales.	Varias plantas activas en Alemania, Francia, Bélgica.	Más de 50 plantas de reciclaje operativas.

*Fuente: Elaboración propia.*

### 7.3.3. Infraestructura de reciclaje y segunda vida

El desarrollo de infraestructura para el reciclaje y la segunda vida de baterías de ion-litio constituye el eje central para enfrentar los volúmenes proyectados

de BFU en Chile. Actualmente, las iniciativas nacionales sólo alcanzan la etapa de pretratamiento y obtención de *black mass*, la cual posteriormente debe ser exportada para su refinamiento en el extranjero. Esto implica que el país carece de plantas hidrometalúrgicas o de reciclaje directo a escala industrial, limitando la recuperación local de materiales críticos como litio, cobalto, níquel y manganeso (Programa Ecomovilidad, 2025).

De acuerdo con las proyecciones de este estudio, en la Figura 7.2 hay un crecimiento exponencial considerable de las BFU, lo que revela una brecha estructural entre la generación futura de residuos y la capacidad instalada en el país, que hoy se limita a experiencias piloto sin una estimación oficial de toneladas efectivamente tratadas.

El documento *Bases para la Economía Circular de Baterías de Ion-Litio en Electromovilidad* (Programa Ecomovilidad, 2025) identifica los principales costos y beneficios asociados al escalamiento de infraestructura de reciclaje: (i) altos costos de inversión inicial en plantas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas, (ii) potenciales beneficios económicos derivados de la valorización de materiales críticos, y (iii) reducción de la dependencia externa al establecer capacidades nacionales de refinamiento.

En consecuencia, se recomienda priorizar el desarrollo de infraestructura de

reciclaje con capacidad de tratamiento progresiva, iniciando en el corto plazo con plantas de escala piloto-industrial (del orden de miles de toneladas por año), y evolucionando hacia instalaciones de gran escala capaces de procesar decenas de miles de toneladas en las décadas de 2040 y 2050. Esta progresión permitirá alinear la infraestructura con el crecimiento proyectado de la electromovilidad y generar sinergias con iniciativas de segunda vida, tales como aplicaciones en almacenamiento estacionario y micromovilidad.

#### **7.4. Ciclo PDCA para la gestión de residuos de las baterías fuera de uso (BFU)**

##### **7.4.1. Planificar (Plan)**

En esta etapa se identifican los componentes clave que deben ser fortalecidos para asegurar la operatividad del sistema, los cuales se agrupan en cuatro ejes estratégicos: regulatorio y normativo, financiero y de incentivos, infraestructura y desarrollo tecnológico, y gobernanza y coordinación institucional. Cada eje reúne un conjunto de medidas que permitirán articular el funcionamiento del sistema REP y cerrar las brechas existentes en materia de trazabilidad, valorización local y coordinación entre actores públicos y privados.

## **1.1 Metas SMART**

Las metas SMART son metas específicas, medibles, alcanzables y con un horizonte temporal definido. Las cuales permiten que los objetivos generales que están establecidos se conviertan en compromisos verificables y con sus plazos concretos, alineados con las etapas del ciclo PDCA.

La Tabla 7.5 presenta la formulación de las metas SMART que estructuran la planificación de la gestión de las BFU entre los años 2026 y 2060, junto con su descripción, plazo estimado e indicador asociado para el seguimiento del desempeño.

**Tabla 7.5:** Metas SMART propuestas para la implementación del sistema REP de baterías fuera de uso.

<b>Meta</b>	<b>Descripción</b>	<b>Plazo</b>	<b>Indicador</b>
<b>SMART 1</b>	Implementar las plantas industriales de reciclaje en el territorio nacional y ampliar progresivamente su capacidad, iniciando con una planta piloto de 5.000 ton/año hacia 2030 y alcanzando al menos 400.000 ton/año al 2060, en concordancia con el crecimiento proyectado de las BFU.	<b>2030–2060</b>	Capacidad instalada nacional (ton/año) y número de plantas operativas.
<b>SMART 2</b>	Incorporar las baterías de electromovilidad en la Ley REP y dictar su reglamento específico.	<b>2027</b>	Reglamento promulgado y publicado en el Diario Oficial.
<i>Continúa en la siguiente página</i>			

**Tabla 7.5:** Metas SMART propuestas para la implementación del sistema REP de baterías fuera de uso (continuación).

<b>Meta</b>	<b>Descripción</b>	<b>Plazo</b>	<b>Indicador</b>
<b>SMART 3</b>	Implementar el Registro Nacional de Baterías (RNB) y la trazabilidad digital (pasaporte de baterías).	<b>2030</b>	≥ 50 % de las baterías registradas en el RNB.
<b>SMART 4</b>	Alcanzar 45 % de tasa de recolección y 35 % de valorización local.	<b>2035</b>	Reporte de cumplimiento REP anual (MMA).
<b>SMART 5</b>	Contar con ≥ 25 empresas REP registradas.	<b>2040</b>	Catastro público de gestores y plantas.
<b>SMART 6</b>	Superar 80 % de trazabilidad digital y 70 % de valorización local.	<b>2050</b>	Auditoría nacional REP.
<i>Continúa en la siguiente página</i>			

**Tabla 7.5:** Metas SMART propuestas para la implementación del sistema REP de baterías fuera de uso (continuación).

<b>Meta</b>	<b>Descripción</b>	<b>Plazo</b>	<b>Indicador</b>
<b>SMART 7</b>	Lograr 90 % de recolección nacional y sostenibilidad operativa del sistema REP.	<b>2060</b>	Informe final de cumplimiento REP 2060.

*Fuente: Elaboración propia.*

## 1.2 Análisis de causa raíz

Para identificar la causa raíz se aplica la metodología de los 5 Porqués, que permite saber la causa que ha conllevado el problema identificado.

**Problema principal:** Desde el año 2021 hasta la fecha, se tiene conocimiento que habrá residuos de BFU en el país, pero no se cuenta con empresas que tengan la capacidad de reciclar las 39 toneladas proyectadas para el 2026 según el caso base.

### **Aplicación de la herramienta de los 5 Porqués:**

1. **¿Por qué** no hay información suficiente sobre el destino de las baterías al final de su vida útil?

Porque la gestión de baterías fuera de uso (BFU) es un tema nuevo en Chile y recién se están desarrollando estudios que proyectan los volúmenes de BFU

que se generarán en el país en las próximas décadas.

2. **¿Por qué** recién se están desarrollando estos estudios?

Porque la adopción de vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento todavía es reciente, y aún no existen datos históricos que permitan estimar de manera precisa el flujo de baterías que llegarán al final de su vida útil.

3. **¿Por qué** no hay datos históricos suficientes?

Porque la introducción masiva de electromovilidad comenzó hace menos de una década y la mayoría de las baterías no ha alcanzado los ciclos completos de vida útil.

4. **¿Por qué** no existe un sistema que anticipe esos flujos futuros?

Porque actualmente no se cuenta con un mecanismo coordinado de recopilación de información entre productores, importadores y organismos públicos.

**Causa raíz identificada:** La falta de un sistema de información nacional que permita anticipar los volúmenes, flujos y destinos de las baterías fuera de uso de electromovilidad en Chile.

### 7.4.2. Hacer (Do)

Las principales contramedidas propuestas se presentan en la Tabla 7.6, donde se detallan las acciones, las organizaciones responsables, los plazos de ejecución y los resultados esperados. Cada una de ellas constituye un paso operativo dentro del proceso de implementación del sistema REP de baterías, sirviendo como base para la puesta en marcha de los instrumentos normativos, financieros y de gobernanza que permitirán alcanzar las metas establecidas en la fase de planificación.

#### Contramedidas propuestas:

**Tabla 7.6:** Contramedidas propuestas para la fase *Do* del ciclo PDCA.

Nº	Contramedida	Responsable principal	Plazo estimado	Resultado esperado
1	Elaborar y promulgar el reglamento REP para baterías de electromovilidad, incorporando metas progresivas de recolección y valorización.	Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	2026	Marco normativo establecido y en aplicación.

*Continúa en la siguiente página*

**Tabla 7.6:** Contramedidas propuestas para la fase *Do* del ciclo PDCA.

Nº	Contramedida	Responsable principal	Plazo estimado	Resultado esperado
2	Desarrollar programas de formación técnica y profesional en diagnóstico, reciclaje e hidrometalurgia.	Ministerio de Educación – CORFO – SEN-CE	2028–2030	Capital humano especializado en al menos tres regiones del país.
3	Implementar el Registro Nacional de Baterías (RNB) compatible entre entidades públicas, que permita la trazabilidad digital de cada unidad mediante código único.	MMA – Ministerio de Energía – SEC – Aduanas	2027	Sistema de trazabilidad activo y con al menos 50% de baterías registradas.
<i>Continúa en la siguiente página</i>				

**Tabla 7.6:** Contramedidas propuestas para la fase *Do* del ciclo PDCA.

<b>Nº</b>	<b>Contramedida</b>	<b>Responsable principal</b>	<b>Plazo estimado</b>	<b>Resultado esperado</b>
4	Ejecutar proyectos piloto de reciclaje y segunda vida en regiones con alta concentración de electromovilidad.	CORFO – Industria privada – Centros de investigación	2027– 2035	Plantas piloto operativas con capacidades de 5.000–20.000 ton/año.
5	Implementar incentivos financieros REP para productores y gestores que superen las metas de recolección y valorización.	MMA – CORFO – Tesorería General	2035– 2040	Sistema de incentivos en funcionamiento y aplicado a empresas REP.
6	Consolidar plantas industriales de reciclaje y refinación con cobertura nacional.	Sector industrial – CORFO – Inversiones privadas	2040– 2060	Capacidad instalada nacional $\geq$ 400.000 ton/año.

*Fuente: Elaboración propia.*

Las contramedidas resumidas en la Tabla 7.6 constituyen la base operativa para la ejecución del sistema REP de baterías fuera de uso (BFU). A partir de ellas, se desarrolla una descripción detallada de cada línea de acción, organizada según los principales ámbitos de intervención:

- Regulación y normativa.
- Incentivos financieros y subsidios.
- Coordinación público–privada

Cada una de estas medidas representa la aplicación práctica de las acciones priorizadas en la fase de planificación, orientadas a establecer un sistema nacional de gestión sostenible y económicamente viable para las baterías de ion–litio en Chile.

### **Regulación y normativa (REP, trazabilidad, pasaporte de baterías)**

El desarrollo de un marco regulatorio específico para las baterías de ion-litio es un requisito esencial para enfrentar el aumento de las BFU en Chile. Actualmente, la Ley N.º 20.920 sobre Responsabilidad Extendida del Productor (REP) no contempla aún a las baterías de electromovilidad como producto prioritario, lo que genera un vacío normativo que podría retrasar la gestión adecuada de los residuos en los próximos años. Por lo que, se propone avanzar en dos líneas de acción complementarias: la incorporación de las baterías a la Ley REP y la implementación de un sistema de trazabilidad nacional que conlleva a

la creación de un pasaporte digital de baterías.

**Incorporación a la Ley REP.** Se propone incluir formalmente las baterías de vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento estacionario dentro de la Ley REP a más tardar en el año 2027. El decreto respectivo debiera fijar un calendario de metas iniciales del orden de 30 % de recolección para 2027 y 60 % hacia 2030, alineadas con el Reglamento (UE) 2023/1542. Asimismo, los productores e importadores deberán financiar la gestión de las BFU y reportar anualmente los volúmenes puestos en el mercado y recuperados.

**Asociaciones empresariales para cumplimiento REP.** Considerando la futura obligación de los productores e importadores de vehículos eléctricos sobre la responsabilidad de la gestión de sus baterías al final de la vida útil, se propone fomentar la formación de empresas colectivas de reciclaje. Estas entidades podrían estar integradas por fabricantes, importadores y distribuidores de vehículos eléctricos, quienes en conjunto financien y operen plantas de reciclaje para cumplir con los porcentajes de recolección y valorización exigidos por la Ley REP. La creación de este tipo de asociaciones similares a los sistemas de gestión colectivos implementados en Europa permitiría optimizar recursos, compartir infraestructura y asegurar el cumplimiento normativo, al mismo tiempo que se impulsa la economía circular dentro del sector automotriz.

**Sistema nacional de trazabilidad.** Respecto a la trazabilidad, se plantea el diseño de un Registro Nacional de Baterías (RNB) administrado por el Ministerio del Medio Ambiente, que permita rastrear el ciclo de vida completo de cada batería. Este registro integrará la información declarada por productores, importadores, distribuidores y gestores, asegurando la trazabilidad desde la fabricación o importación hasta la valorización final. Para reforzar este mecanismo, la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) podrá exigir a los productores e importadores la incorporación y reporte digital de cada unidad o lote de baterías al sistema RNB mediante resolución exenta, estableciendo códigos únicos (QR o RFID) en el momento del ingreso al país. La plataforma digital del RNB será compatible con los sistemas de aduanas, transporte de residuos peligrosos y permisos ambientales, garantizando el control de cada una de las partes.

**Pasaporte digital de baterías.** Inspirado en la experiencia europea, se propone la adopción de un pasaporte digital de baterías que acompañe a cada unidad durante su ciclo de vida. Este pasaporte contendrá información técnica relevante, incluyendo composición química, capacidad energética, número de serie, fecha de fabricación, historial de mantenimiento, diagnóstico de salud (*State of Health, SOH*) y responsable actual. Cada batería o lote recibirá un código único (QR o RFID) vinculado al RNB, permitiendo al Estado y a los gestores disponer de datos precisos para planificar procesos de recolección, reciclaje y segunda vida. Este sistema de pasaporte digital es, por tanto, una herramienta esencial dentro del sistema de trazabilidad, asegurando una visibilidad total de las baterías desde

su inicio hasta su valorización final.

## **Incentivos financieros y subsidios**

Establecer mecanismos de financiamiento e incentivos económicos es un componente clave para acelerar la implementación del sistema nacional de gestión de BFU. Hasta ahora, la política pública en Chile se ha concentrado principalmente en la promoción de la electromovilidad mediante subsidios directos a la adquisición de vehículos eléctricos y programas orientados a flotas comerciales o de transporte público. Sin embargo, a medida que el parque vehicular eléctrico aumente, será necesario complementar estos instrumentos con incentivos que fomenten la gestión responsable y el reciclaje de las baterías al final de su vida útil.

Se propone que el Estado, a través de instituciones como CORFO y la Agencia de Sostenibilidad Energética, extienda el alcance de sus programas de apoyo para incluir líneas específicas de financiamiento orientadas a:

- Empresas emergentes y proyectos de innovación dedicados al reciclaje y segunda vida de baterías.
- Instalación de plantas piloto e infraestructura de pretratamiento e hidrometalurgia, con cofinanciamiento público–privado y apoyo a la transferencia tecnológica.
- Programas de capacitación y desarrollo de capital humano especializado, centrados en el diagnóstico, desmontaje y valorización de baterías de ion-litio.

Además, se plantea la posibilidad de implementar un incentivo al consumidor final, en forma de subsidio o descuento compensatorio al momento de entregar su batería usada en puntos de recolección autorizados o al reemplazarla por una nueva. Este tipo de incentivo similar al modelo europeo de retorno o “*take-back scheme*” permitiría aumentar las tasas de recuperación de baterías y fomentar la participación ciudadana en la economía circular.

Finalmente, se recomienda que CORFO, junto con el Ministerio de Hacienda, evalúe la creación de un fondo verde para reciclaje de baterías, financiado parcialmente con aportes de los productores y con recursos de cooperación de instituciones internacionales que les interesa el tema de mitigar los GEI. Este fondo podría utilizarse para cubrir los costos iniciales de inversión en infraestructura y los programas de incentivo al reciclaje, asegurando la sostenibilidad económica del sistema en sus etapas iniciales.

### **Coordinación público–privada**

El desarrollo de un sistema nacional de gestión de BFU requiere de una buena interacción entre el sector público, la industria automotriz, los gestores de residuos y el sistema científico–tecnológico. La experiencia internacional demuestra que los modelos de gobernanza más exitosos en economía circular son aquellos que combinan liderazgo estatal, compromiso empresarial y apoyo académico, generando sinergias entre regulación, innovación y financiamiento.

Se propone conformar un Consejo Público–Privado de Economía Circular para Ba-

terías, que reúna a productores, importadores, gestores autorizados, universidades y centros de investigación. Este consejo actuaría como una instancia de asesoría permanente, encargada de:

- Proponer mejoras a la regulación y a los mecanismos de financiamiento.
- Facilitar la creación de alianzas tecnológicas y proyectos de innovación aplicada.
- Monitorear el cumplimiento de metas REP y los indicadores nacionales de reciclaje.

La coordinación público–privada permitirá fortalecer la gobernanza del sistema, reducir la fragmentación institucional y asegurar que los esfuerzos en investigación, inversión y regulación se orienten hacia objetivos comunes. También, fomentará la transferencia tecnológica y la colaboración entre actores, elementos esenciales para alcanzar una economía circular en torno a las baterías de ion-litio y a la electromovilidad en Chile.

#### **7.4.3. Verificar (Check)**

En esta etapa del ciclo PDCA se realiza el seguimiento y verificación de los avances asociados a la implementación del sistema REP de baterías fuera de uso (BFU). Su propósito es evaluar la efectividad de las acciones planificadas, determinar el grado de cumplimiento de las metas e identificar desviaciones que requieran medidas correctivas.

Para este fin, se ha establecido un cronograma que resume los principales hitos normativos, técnicos y operativos entre los años 2026 y 2060, tal como se muestra en la

Figura 7.4. Este cronograma sintetiza los momentos clave del proceso y permite visualizar la secuencia lógica de actividades necesarias para consolidar un sistema REP funcional y autosostenible.

Acciones Principales	Fecha Inicio	Fecha Término
Elaboración y promulgación del Reglamento REP para baterías	2026	2026
Desarrollo de proyectos piloto de reciclaje y segunda vida	2026	2026
Elaboración de sistema de trazabilidad	2026	2026
Primera planta industrial de 5.000 ton de capacidad	2026	2026
Aplicación de la Ley REP	2026	2027
Diseño técnico del Registro Nacional de Baterías (RNB)	2027	2027
Pruebas piloto del RNB	2027	2035
Puesta en marcha del RNB y pasaporte digital obligatorio	2027	2028
Fiscalización inicial y primeras metas REP	2028	2028
Formación de capital humano y programas técnicos	2028	2030
Escalamiento nacional del sistema REP	2029	2029
Fortalecimiento del mecanismo de incentivos REP	2029	2030
Evaluación intermedia del desempeño REP	2030	2035
Aumento capacidad instalada a 10.000 ton de capacidad	2030	2030
Auditoría nacional del sistema REP	2035	2036
Aumento capacidad instalada entre 20.000 - 40.000 ton	2035	2040
Implementación de incentivos financieros REP	2035	2040
Revisión del esquema de incentivos REP	2038	2039
Operación de plantas integradas de refinación	2040	2045
Segunda auditoría nacional del sistema REP	2041	2042
Ajuste de metas nacionales	2043	2043
Aumento capacidad instalada entre 100.000 - 200.000 ton	2045	2050
Implementación de mejoras tecnológicas	2046	2046
Tercera auditoría nacional del sistema REP	2047	2049
Alianza público-privada de innovación	2047	2054
Aumento capacidad instalada a 400.000 ton	2055	2060
Evaluación final del sistema REP	2060	2060

**Figura 7.4:** Carta Gantt resumida para el sistema de gestión de BFU (2026–2060).

En la etapa inicial (2026–2027) destacan las acciones regulatorias y técnicas que habilitan el funcionamiento del sistema como lo es la elaboración y promulgación del reglamento REP, a cargo del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), y el diseño del sistema

de trazabilidad liderado por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y el Ministerio de Energía. La aprobación de esta trazabilidad mediante resolución exenta resulta fundamental, ya que sin su validación no se puede avanzar hacia la implementación del Registro Nacional de Baterías (RNB) ni hacia las pruebas piloto de pasaporte digital.

Entre 2028 y 2035 se concentran los procesos de fortalecimiento operativo, incluyendo la formación de capital humano técnico por parte del Ministerio de Educación, SENCE y CORFO, el escalamiento nacional del sistema REP y el inicio de la fiscalización de las primeras metas de recolección y valorización. En este período también se ejecutan las auditorías intermedias, que permiten ajustar los mecanismos de incentivos financieros y las metas de desempeño.

Posteriormente, entre 2040 y 2050, se consolidan las fases industriales y tecnológicas, con la operación de plantas integradas de refinación, la incorporación de mejoras tecnológicas y el aumento progresivo de la capacidad instalada hasta alcanzar entre 100.000 y 200.000 toneladas anuales. Estas acciones son impulsadas por el sector privado en colaboración con CORFO y el MMA, y representan la transición hacia la autosuficiencia nacional en valorización.

Finalmente, el período 2055–2060 corresponde a la fase de madurez del sistema, en la que se alcanzan como mínimo los 400.000 ton/año de capacidad instalada y se realiza la evaluación final del desempeño del sistema REP. Este proceso, coordinado por el MMA y el Comité REP-BFU, marca el cierre del ciclo PDCA e impulsa la formulación de nuevas

metas más allá del año 2060.

La carta Gantt resumida presentada en esta sección facilita la comprensión general del proceso, mientras que el detalle completo de los plazos esperados se mantiene disponible en el Anexo 9.2. En conjunto, ambas herramientas permiten un seguimiento integral del progreso nacional en la gestión de baterías fuera de uso, articulando las funciones de cada entidad pública y privada bajo un enfoque de mejora continua.

#### **7.4.4. Actuar (Act)**

En esta fase del ciclo PDCA se establecen los mecanismos de seguimiento y mejora continua de las BFU. A partir de los resultados obtenidos en la etapa del check, se impulsan ajustes normativos, técnicos y operativos orientados a optimizar la trazabilidad, la recolección y la valorización de baterías en el territorio nacional.

Con el fin de asegurar la sostenibilidad y el aprendizaje institucional, se propone crear un proceso formal de seguimiento anual que permita identificar brechas, sistematizar lecciones aprendidas y anticipar desafíos en la implementación del sistema. Este proceso deberá estar liderado por el Comité Nacional REP-BFU, en coordinación con el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), CORFO y la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), responsables de recopilar, consolidar y analizar la información reportada por los gestores y productores.

La Tabla 7.7 presenta los indicadores propuestos para el monitoreo del desempeño

del sistema. Estos indicadores permiten evaluar el grado de cumplimiento de las metas de recolección, valorización, capacidad instalada y trazabilidad digital, incorporando además la distinción entre las baterías que son destinadas a procesos de segunda vida y aquellas que ingresan directamente a reciclaje final. Esta diferenciación permite medir con mayor precisión la eficiencia del sistema REP-BFU, considerando que las baterías reutilizadas prolongan temporalmente su ciclo de vida antes de su valorización definitiva. De este modo, los indicadores propuestos entregan una visión integral del avance del sistema en términos de circularidad, eficiencia operativa y aprovechamiento de materiales críticos.

**Tabla 7.7:** Indicadores de seguimiento propuestos para la fase *Actuar* del ciclo PDCA del sistema REP-BFU.

Nº	Indicador	Fórmula general	Unidad	Frecuencia	Objetivo
1	Tasa de recolección de BFU	$\frac{\text{BFU recolectadas}}{\text{BFU generadas}} \times 100$	%	Anual	Aumentar progresivamente hasta 90 % al 2060.
<i>Continúa en la siguiente página</i>					

**Tabla 7.7:** Indicadores de seguimiento propuestos para la fase *Actuar* del ciclo PDCA del sistema REP-BFU (continuación).

Nº	Indicador	Fórmula general	Unidad	Frecuencia	Objetivo
2A	Porcentaje de BFU destinadas a segunda vida	$\frac{\text{BFU reutilizadas}}{\text{BFU recolectadas}} \times 100$	%	Anual	<p>Aumentar la reutilización en las primeras etapas del sistema un 40 % hacia 2035, reduciendo progresivamente su proporción a medida que las baterías cumplan su ciclo de vida y sean derivadas al reciclaje.</p>
<i>Continúa en la siguiente página</i>					

**Tabla 7.7:** Indicadores de seguimiento propuestos para la fase *Actuar* del ciclo PDCA del sistema REP-BFU (continuación).

Nº	Indicador	Fórmula general	Unidad	Frecuencia	Objetivo
2B	Porcentaje de BFU recicladas directamente	$\frac{\text{BFU recicladas}}{\text{BFU recolectadas}} \times 100$	%	Anual	Incrementar sostenidamente la proporción de reciclaje directo, superando el 60 % hacia 2050 y alcanzando más del 80 % al 2060, de modo que la valorización final predomine sobre la segunda vida.
<i>Continúa en la siguiente página</i>					

**Tabla 7.7:** Indicadores de seguimiento propuestos para la fase *Actuar* del ciclo PDCA del sistema REP-BFU (continuación).

Nº	Indicador	Fórmula general	Unidad	Frecuencia	Objetivo
3	Porcentaje de valorización local (total)	$\frac{\text{BFU valorizadas localmente}}{\text{BFU recolectadas}} \times 100$	%	Anual	Fomentar la valorización nacional empezando con un 35% al 2035 y un 70% al 2050.
<i>Continúa en la siguiente página</i>					

**Tabla 7.7:** Indicadores de seguimiento propuestos para la fase *Actuar* del ciclo PDCA del sistema REP-BFU (continuación).

Nº	Indicador	Fórmula general	Unidad	Frecuencia	Objetivo
4	Número de proyectos piloto activos	Conteo anual de proyectos en operación	Nº	Anual	Mantener al menos tres proyectos piloto activos al 2030, y convertir al menos uno de ellos en planta semiindustrial hacia 2035.
<i>Continúa en la siguiente página</i>					

**Tabla 7.7:** Indicadores de seguimiento propuestos para la fase *Actuar* del ciclo PDCA del sistema REP-BFU (continuación).

Nº	Indicador	Fórmula general	Unidad	Frecuencia	Objetivo
5	Cantidad de empresas REP registradas	Total de productores y gestores activos en el sistema REP	Nº	Anual	Ampliar la cobertura y participación del sistema, con más de 25 empresas registradas al 2040.
6	Capacidad instalada nacional	Suma total de capacidad de procesamiento instalada	ton/año	Anual	Alcanzar 400.000 ton/año al 2060.
<i>Continúa en la siguiente página</i>					

**Tabla 7.7:** Indicadores de seguimiento propuestos para la fase *Actuar* del ciclo PDCA del sistema REP-BFU (continuación).

Nº	Indicador	Fórmula general	Unidad	Frecuencia	Objetivo
7	Cobertura de trazabilidad digital	$\frac{\text{Baterías registradas en RNB}}{\text{BFU recolectadas}} \times 100$	%	Anual	Lograr cobertura del 100% en el RNB y pasaporte digital.
8	Capacidad no reciclada anual (brecha REP)	$\text{BFU generadas} - \text{BFU valorizadas}$	ton/año	Anual	Reducir progresivamente la brecha hasta 0 ton/año al 2060.

*Fuente: Elaboración propia.*

A partir de estos indicadores, se identificaron los principales hitos críticos cuya correcta ejecución condiciona el éxito del sistema. A continuación se describen las posibles fallas, los organismos responsables y las acciones recomendadas para asegurar su funcionamiento dentro del marco de mejora continua.

## **Hito crítico 1: Autorización de la trazabilidad digital por parte de la SEC**

La trazabilidad digital constituye la base operativa del sistema, ya que permite identificar cada batería que ingresa al país mediante un código único (QR o RFID) y vincularla con su productor, importador o distribuidor. Este registro habilita el funcionamiento del Registro Nacional de Baterías (RNB) y del pasaporte digital, lo que asegura el seguimiento durante todo el ciclo de vida de la batería.

La exigencia de toda la información que deben tener las baterías mediante este identificador, la debe imponer la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), mediante una resolución exenta. En la página oficial de la SEC se detallan los plazos y procedimientos para la emisión de estas resoluciones, lo que permite su incorporación al sistema sin depender de cambios legislativos.

**Riesgo en caso de atraso o falla.** Si la resolución exenta de la SEC no se publica dentro del plazo estimado o su aplicación se posterga, se retrasan los hitos de pruebas piloto del pasaporte digital y la puesta en marcha del RNB que es previsto entre 2027–2028. Esto impide exigir la identificación única a los importadores y, por lo tanto, limita la capacidad del Estado para rastrear las baterías y validar los indicadores de trazabilidad. La consecuencia directa sería la falta de control sobre las baterías ingresadas al país, subregistro de flujos y atraso en la fiscalización del cumplimiento de las metas REP iniciales, afectando la credibilidad y el ritmo de implementación del sistema.

**Responsables principales.**

- **Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC):** Encargada de emitir la resolución exenta que establezca la obligatoriedad de la trazabilidad y definir los parámetros técnicos del identificador único.
- **Ministerio del Medio Ambiente (MMA):** Coordinador técnico del Registro Nacional de Baterías (RNB) y del sistema de reporte REP.
- **Ministerio de Energía:** Apoyo institucional y articulador entre la SEC y el MMA, garantizando coherencia con las políticas de electromovilidad.
- **Servicio Nacional de Aduanas:** Encargado del control en frontera, verificando que toda batería importada cumpla con la norma de trazabilidad.

**Acciones correctivas para asegurar su funcionamiento.**

1. *Emisión prioritaria de resolución exenta SEC-MMA.* Gestionar la publicación de la resolución dentro del año 2026, considerando el calendario oficial de la SEC, de modo que su aplicación entre en vigencia antes del inicio de los pilotos de trazabilidad.
2. *Implementación progresiva.* Aplicar inicialmente la exigencia de código único a los importadores y distribuidores de baterías de electromovilidad, para luego ampliarla a otros usos ya sea industrial o estacionario.
3. *Comité técnico interinstitucional.* Formar un comité permanente SEC–MMA–Energía–Aduanas

para monitorear la aplicación de la resolución, resolver contingencias y emitir directrices conjuntas sobre compatibilidad de sistemas.

4. *Fiscalización y verificación digital.* Diseñar un sistema de control automatizado que integre los datos de trazabilidad desde Aduanas hacia el RNB, validando que ninguna batería se comercialice sin código de identificación.
5. *Plan de contingencia en caso de atraso.* Si la resolución se retrasa, se deberá iniciar un esquema transitorio de trazabilidad declarativa, en el que los importadores reporten al MMA la cantidad y tipo de baterías ingresadas, generando un pre-registro que permita continuar con las etapas posteriores sin paralizar el proceso.

## **Hito crítico 2: Incorporación efectiva de las baterías de ion-litio al régimen obligatorio de la Ley REP mediante decreto de metas**

La Ley N.º 20.920 establece el marco general de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), según el cual los productores e importadores de ciertos productos prioritarios son responsables de financiar y organizar la gestión de los residuos que esos productos generan al final de su vida útil. Este régimen se activa para cada flujo específico a través de un decreto supremo del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) que define la categoría prioritaria, identifica quién es considerado “productor” y fija metas obligatorias de recolección y valorización asociadas a plazos definidos.

En la actualidad, el MMA ha iniciado formalmente el proceso de elaboración del

decreto REP para baterías, lo que da inicio a la construcción de metas específicas para este flujo. Dicho proceso busca establecer obligaciones para las baterías de ion-litio, particularmente relevantes en el contexto de la electromovilidad y de los sistemas de almacenamiento energético. Sin embargo, mientras este decreto no se publique y entre en vigencia, los productores e importadores de baterías de electromovilidad no tienen la obligación legal de financiar la recolección, el transporte ni la valorización de las baterías fuera de uso (BFU), y por lo tanto, no existe aún una exigencia de cumplimiento verificable ni un esquema de fiscalización asociada a metas.

**Riesgo en caso de atraso o no aprobación.** Si la publicación del decreto que incorpora formalmente a las baterías de ion-litio dentro del régimen REP se retrasa, no se podrá exigir a los productores e importadores que cumplan metas anuales de recolección y valorización. Esto posterga la entrada en operación del sistema REP-BFU y debilita otros hitos dependientes, como la aplicación temprana de metas iniciales (2026–2028), la fiscalización de cumplimiento y el financiamiento estable de las primeras plantas de valorización. En términos operativos, el sistema quedaría limitado a iniciativas voluntarias o pilotos acotados, sin una base jurídica que obligue a hacerse cargo de los volúmenes proyectados de BFU.

**Responsables principales.**

- **Ministerio del Medio Ambiente (MMA):** Responsable de elaborar el decreto supremo que fija metas de recolección y valorización para las baterías de ion-litio

e identifica formalmente a los productores obligados.

- **Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático:** Instancia que revisa y aprueba el decreto antes de su publicación.
- **Secretaría General de la Presidencia (SEGPRES):** Encargada de coordinar la tramitación administrativa y asegurar la entrada en vigencia oportuna del decreto.
- **Productores e importadores del sector automotriz y energético:** Actores obligados una vez publicado el decreto, tanto en financiamiento como en organización de sistemas de gestión colectivos.

**Acciones correctivas o pasos para asegurar su funcionamiento.**

1. *Impulso normativo temprano.* Iniciar y priorizar durante el año 2026 la tramitación del decreto de metas REP para baterías, de manera de contar con obligaciones vigentes antes del despliegue completo de las metas iniciales de recolección y valorización.
2. *Elaboración de un expediente técnico robusto.* Respaldar la propuesta normativa con proyecciones de generación de BFU, estimaciones de riesgo ambiental y análisis de capacidad instalada, para reducir la probabilidad de observaciones técnicas o regulatorias durante su revisión interministerial.
3. *Consulta sectorial con la industria.* Ejecutar un proceso de consulta con importadores, fabricantes, operadores de flotas eléctricas y gestores de residuos, con el fin

de alinear definiciones de alcance, categorías y plazos, minimizando la oposición posterior y aumentando la viabilidad de implementación.

4. *Priorización política en el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad.* Solicitar tratamiento prioritario del decreto, argumentando su contribución directa a las metas nacionales de electromovilidad y a los compromisos de carbono neutralidad.
5. *Mecanismo transitorio en caso de retraso.* En caso de postergación de la publicación del decreto, establecer convenios de cumplimiento voluntario entre el MMA y los principales importadores y comercializadores de baterías de electromovilidad. Estos convenios deben contemplar metas de recolección y trazabilidad mínimas, permitiendo avanzar en la práctica hacia el esquema REP-BFU incluso antes de su obligatoriedad legal.

En consecuencia, la dictación oportuna del decreto REP específico para baterías de ion-litio no es solo un requisito normativo, sino una condición habilitante para asegurar financiamiento estable, fiscalización efectiva y responsabilidad operativa de los actores del mercado. Su retraso desplaza todo el cronograma de implementación del sistema REP-BFU y limita la capacidad del Estado para exigir resultados verificables en materia de recolección, valorización y trazabilidad.

## **Casos de contingencia y medidas correctivas para la gestión de BFU**

La implementación del sistema REP-BFU puede enfrentar diversas contingencias técnicas, administrativas o institucionales que, si bien no detienen por completo el proceso, pueden comprometer su efectividad o retrasar el cumplimiento de las metas establecidas. A continuación, se presentan los principales escenarios identificados, junto con los actores responsables y las medidas correctivas que permitirían asegurar la continuidad y mejora del sistema.

### **Caso 1: Retraso en la puesta en marcha de las plantas de reciclaje y valorización**

**Descripción:** La tramitación ambiental, las demoras en inversión o la falta de permisos de operación pueden retrasar la entrada en funcionamiento de las plantas de reciclaje previstas entre 2026 y 2030. **Impacto:** Aumento temporal de las baterías almacenadas y reducción del porcentaje de valorización local, afectando el cumplimiento de las metas del sistema REP-BFU y la confianza pública en su avance. **Responsables principales:** CORFO, Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y sector privado inversionista. **Medidas de acción:**

- Priorizar en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) los proyectos industriales de reciclaje de baterías, reconociéndolos como infraestructura estraté-

ca nacional.

- Establecer acuerdos de prefinanciamiento público–privado mediante CORFO o Bancos para reducir los riesgos de inversión inicial.
- Implementar plantas piloto modulares o móviles como solución temporal para evitar el acopio prolongado de BFU.

## **Caso 2: Incumplimiento de metas de recolección por parte de productores**

**Descripción:** Algunos productores o gestores REP podrían no alcanzar las metas anuales de recolección por falta de logística, incentivos o mecanismos de fiscalización.

**Impacto:** Disminución del indicador de tasa de recolección y pérdida de trazabilidad del flujo de residuos. **Responsables principales:** MMA, Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), empresas productoras e importadoras. **Medidas de acción:**

- Exigir planes de cumplimiento corregidos dentro de un plazo máximo de seis meses.
- Aplicar sanciones progresivas o suspensión de beneficios REP por incumplimiento reiterado.
- Ejecutar auditorías externas e inspecciones aleatorias a los sistemas de gestión colectivos.

### **Caso 3: Baja participación de productores en los sistemas colectivos REP**

**Descripción:** La falta de coordinación entre productores e importadores puede derivar en sistemas de gestión fragmentados o ineficientes. **Impacto:** Menor economía de escala, mayores costos operativos por tonelada reciclada y duplicidad de esfuerzos administrativos. **Responsables principales:** MMA, CORFO, asociaciones gremiales y productores adherentes. **Medidas de acción:**

- Promover la formación de sistemas de gestión colectivos mediante beneficios tributarios y fondos de innovación.
- Crear un registro nacional unificado de productores REP y sus compromisos anuales.
- Facilitar instancias de articulación sectorial lideradas por el MMA y CORFO.

### **Caso 4: Falta de capital humano especializado en reciclaje e hidrometalurgia**

**Descripción:** La demanda de personal técnico y profesional capacitado podría superar la oferta disponible, especialmente en regiones donde se proyectan las plantas de reciclaje. **Impacto:** Retrasos en la operación de las plantas y disminución de la eficiencia industrial. **Responsables principales:** Ministerio de Educación (MINEDUC), Servicio Nacional de Capacitación y Empleo (SENCE), CORFO y universidades regionales. **Medidas de acción:**

- Desarrollar programas técnicos duales (educación + práctica) en colaboración con SENCE y universidades regionales.
- Incluir módulos de gestión de residuos peligrosos, trazabilidad y economía circular en carreras técnicas e ingenierías.
- Promover certificaciones laborales REP reconocidas por el MMA.

#### **Caso 5: Comunicación deficiente entre el Registro Nacional de Baterías (RNB) y sistemas de control aduanero**

**Descripción:** La integración tecnológica entre la SEC, Aduanas y el MMA podría presentar incompatibilidades de datos o demoras en la sincronización de registros. **Impacto:** Subregistro de baterías importadas y pérdida temporal de trazabilidad digital. **Responsables principales:** SEC, Servicio Nacional de Aduanas, MMA y Ministerio de Energía.

#### **Medidas de acción:**

- Desarrollar protocolos de comunicación basados en estándares nacionales de intercambio de información.
- Implementar una plataforma digital con autenticación unificada y control en línea.
- Realizar pruebas piloto semestrales de verificación y consistencia de datos entre instituciones.

## **Caso 6: Brecha entre capacidad instalada y volumen real de BFU generadas**

**Descripción:** El crecimiento acelerado del parque vehicular eléctrico podría generar volúmenes de BFU superiores a la capacidad instalada nacional. **Impacto:** Saturación del sistema, aumento de exportaciones y acumulación temporal de residuos. **Responsables principales:** MMA, CORFO, Ministerio de Energía y sector industrial privado. **Medidas de acción:**

- Actualizar las proyecciones de generación de BFU cada dos años para ajustar metas e inversiones.
- Incentivar la expansión de infraestructura mediante bonos REP y fondos de innovación tecnológica.
- Autorizar exportaciones temporales bajo control del MMA mientras se amplía la capacidad local.

## **Caso 7: Fallas en la trazabilidad digital o pérdida de información en el RNB**

**Descripción:** Fallas técnicas o ciberataques pueden comprometer la integridad de la base de datos de trazabilidad. **Impacto:** Interrupción temporal del seguimiento de baterías, afectando la validez de los indicadores de control. **Responsables principales:** SEC, MMA, Ministerio de Energía y División de Gobierno Digital. **Medidas de acción:**

- Implementar copias de seguridad automatizadas y auditorías de ciberseguridad.

- Definir un protocolo de respaldo manual en caso de contingencia.
- Utilizar servicios de infraestructura digital con certificación ISO 27001 y respaldo en la nube estatal.

### **Caso 8: Descoordinación institucional en la gobernanza del sistema**

**Descripción:** La multiplicidad de actores públicos puede generar redundancia de funciones o falta de liderazgo operativo. **Impacto:** Retrasos en la toma de decisiones y en la implementación de políticas de seguimiento. **Responsables principales:** MMA, CORFO, Ministerio de Energía, Tesorería General y SEC. **Medidas de acción:**

- Crear un Comité Nacional REP-BFU con representantes de cada institución clave y reuniones trimestrales de coordinación.
- Elaborar un reglamento interno de funciones y responsabilidades operativas.
- Establecer indicadores de gestión interinstitucional asociados al cumplimiento de plazos y ejecución de metas.

### **Caso 9: Desconfianza pública o técnica respecto a la segunda vida de las baterías fuera de uso**

**Descripción:** Una parte importante de las baterías fuera de uso (BFU) podrá destinarse a aplicaciones de segunda vida, tales como sistemas de respaldo energético o almacena-

miento estacionario. Sin embargo, la ausencia de un mecanismo formal de certificación de su estado real de salud (*State of Health, SoH*) puede generar desconfianza tanto en los usuarios como en las empresas distribuidoras, dificultando la comercialización o reutilización segura de estas unidades. **Impacto:** Baja aceptación de las baterías reacondicionadas, riesgo de incidentes eléctricos por manipulación inadecuada y aumento del volumen de baterías que se destinan directamente al reciclaje, reduciendo la eficiencia del sistema REP-BFU y su rentabilidad ambiental. **Responsables principales:** Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), Ministerio de Energía, CORFO, y centros técnicos acreditados por el Instituto Nacional de Normalización (INN). **Medidas de acción:**

- Crear un **programa de capacitación y certificación SEC** para técnicos e ingenieros encargados de evaluar el SoH de las baterías antes de su reutilización, estableciendo procedimientos estandarizados de medición y diagnóstico.
- Implementar un **sello de aprobación SEC** visible en las baterías certificadas para segunda vida, que indique el porcentaje de capacidad remanente validado oficialmente.
- Desarrollar un **registro nacional de baterías certificadas para segunda vida**, compatible con el Registro Nacional de Baterías (RNB), que permita rastrear su nueva aplicación y asegurar su control en la fase post-reutilización.
- Difundir campañas de comunicación ciudadana sobre los beneficios y garantías

de seguridad de las baterías certificadas, fortaleciendo la confianza pública en la economía circular de la electromovilidad.

- Establecer incentivos tributarios o financieros para empresas que incorporen baterías certificadas de segunda vida en sus sistemas de almacenamiento o respaldo energético.

Los nueve casos de contingencia presentados permiten anticipar y mitigar riesgos asociados a la implementación, tales como retrasos en infraestructura, fallas de interoperabilidad, déficit de capital humano, descoordinación institucional o desconfianza en la segunda vida de las baterías. Este enfoque preventivo refuerza la capacidad de respuesta del sistema, asegurando la continuidad de las operaciones y la credibilidad de los indicadores de desempeño definidos en la fase anterior.

## 8. Conclusiones

La presente memoria permitió proyectar el comportamiento futuro del flujo de baterías fuera de uso (BFU) provenientes del sector de electromovilidad en Chile y establecer lineamientos estratégicos para implementar una gestión sostenible. Se adoptó un enfoque integral que combinó modelación cuantitativa de escenarios, planificación operacional mediante el ciclo PDCA y análisis de factores institucionales, técnicos y económicos que condicionan la transición hacia una economía circular.

La proyección del volumen de BFU evidenció un crecimiento exponencial durante las próximas tres décadas, resultado consistente con la rápida expansión del parque de vehículos eléctricos impulsada por la estrategia nacional de electromovilidad. En el escenario base, el volumen acumulado hacia 2060 podría superar los 1,8 millones de toneladas y en un escenario optimista acercarse a 3,6 millones de toneladas. Este comportamiento responde a la fase de aceleración del mercado. Sin embargo, cuando las ventas de vehículos eléctricos alcancen su madurez y todos los vehículos comercializados en el país sean eléctricos, la tendencia debiera estabilizarse, creciendo de forma proporcional al ritmo actual de ventas y sin incrementos bruscos. Estas cifras muestran la urgencia de anticipar capacidades y fortalecer la infraestructura de recolección, transporte y valorización.

El análisis permitió identificar brechas estructurales en el sistema nacional, partiendo por la ausencia de una normativa REP específica para baterías de ion-litio, la falta de trazabilidad integral y la limitada infraestructura de valorización local. Para abordar estas carencias se propuso la creación de un Registro Nacional de Baterías (RNB) articulado

con los sistemas de la SEC, Aduanas y el Ministerio del Medio Ambiente, junto con un pasaporte digital que acompañe cada unidad desde su importación hasta su disposición final. Asimismo, se definieron metas SMART e indicadores de desempeño orientados a monitorear la recolección, la valorización, la capacidad instalada, la trazabilidad y la brecha no reciclada.

Los resultados demuestran que, bajo una implementación adecuada del sistema REP-BFU, Chile podría alcanzar hacia 2060 tasas de recolección cercanas al 90 %, una valorización local superior al 80 % y una capacidad instalada mínima de 400.000 toneladas anuales, reduciendo la dependencia del reciclaje internacional y posicionando al país como referente regional en la gestión de residuos tecnológicos.

El ciclo PDCA se consolidó como una herramienta clave para asegurar la relación entre los objetivos técnicos y las decisiones estratégicas, ya que, permite ordenar la implementación en etapas de planificación, ejecución, verificación y mejora. Su aplicación resulta especialmente relevante considerando que la gestión de BFU es un ámbito nuevo para Chile, por lo que, la supervisión continua, la retroalimentación periódica y el ajuste oportuno de los procesos son esenciales para lograr resultados sostenibles y una operación confiable del sistema REP.

La metodología desarrollada también es aplicable a otros flujos emergentes de residuos tecnológicos, como los paneles fotovoltaicos, que presentan desafíos similares en materia de trazabilidad, recuperación y valorización. Además, en el largo plazo se proyecta que

la generación de BFU tenderá a estabilizarse una vez que el mercado de electromovilidad alcance su madurez. Desde ese punto, la variabilidad del sistema disminuirá y la planificación requerirá ajustar capacidades en función del crecimiento anual de las ventas de vehículos eléctricos.

En conjunto, este estudio entrega una base cuantitativa, normativa y estratégica para la toma de decisiones en la gestión de BFU en Chile. La combinación de análisis técnico, modelación de escenarios y gestión continua mediante PDCA constituye un aporte concreto para el diseño de políticas públicas y para el desarrollo de sistemas REP replicables en otros sectores tecnológicos emergentes.

## Bibliografía

- Argonne National Laboratory. (2023). Li-Bridge: Building a Robust and Resilient U.S. Lithium Battery Supply Chain [Industry report with 26 recommended actions]. <https://netl.doe.gov/sites/default/files/2023-03/Li-Bridge%20-%20Building%20a%20Robust%20and%20Resilient%20U.S.%20Lithium%20Battery%20Supply%20Chain.pdf>
- Asociación Nacional Automotriz de Chile. (2025). Informe Cero y Bajas Emisiones – Mayo 2025. <https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2025/06/05-ANAC-Informe-Cero-y-Bajas-Emisiones-Mayo-2025.pdf>
- Associated Press. (2023). Nevada battery recycler wins \$2B loan from U.S. Energy Department [Loan to Redwood Materials under ATVM program]. <https://apnews.com/article/430b1bf8f90e40f7effc6248bde98>
- Auto Recycling World. (2023). China set to strengthen EV battery recycling regulation: upgrades and enhancements planned [Overview of MIIT tightening recovery rate targets and traceability]. <https://autorecyclingworld.com/china-set-to-strengthen-ev-battery-recycling-regulation-upgrades-and-enhancements-planned/>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2022). Impacto económico en el crecimiento automotriz en Chile [Versión final].

- CircularTec. (2025). Proyecto LiBR3: Lithium Battery Reuse, Recycling and Reduction [Proyecto adjudicado por CORFO]. <https://circulartec.cl/en/circulartec-se-adjudica-innovador-proyecto-para-la-reutilizacion-de-baterias-de-litio-un-paso-gigante-hacia-la-economia-circular-en-chile/>
- CORFO. (2024). Desafíos de I+D: segunda vida de baterías para plantas de almacenamiento. <https://www.economia.gob.cl/2024/01/31/corfo-convoca-desafios-de-id-para-desarrollo-de-litio-metalico-segunda-vida-de-baterias-y-cobre-verde.htm>
- E2Ingeniería. (2025). Sistema modular de almacenamiento basado en baterías de segunda vida. <https://reportesostenible.cl/blog/proyecto-de-almacenamiento-energetico-que-utiliza-baterias-de-litio-de-vehiculos-electricos-de-segunda-vida-se-adjudica-concurso-corfo/>
- European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1542 concerning batteries and waste batteries [Official Journal L 191, 28.7.2023; establishes battery passport, EPR, collection targets and recycled content]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj/eng>
- GIZ. (2022). Taller Final: Proyección y gestión de baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en Chile [Santiago, Chile].

- Gobierno de Chile. (2022). Ley N.º 21.505: Promueve el almacenamiento de energía eléctrica y la electromovilidad. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1184572>
- Hachim Campos, M. (2018). Evaluación económica de la segunda vida útil de baterías en agricultura [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169855>
- International Energy Agency. (2023). Batteries and Secure Energy Transitions [Reporte especial de la IEA. Describe la caída de precios de baterías de litio-ion desde alrededor de USD 1400/kWh en 2010 hasta menos de USD 140/kWh en 2023.]. <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
- International Energy Agency. (2025). Global EV Outlook 2025: Catching up with climate ambitions. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- Jiménez, B. (2024). *Proyección del parque vehicular eléctrico en Chile y estimación de generación de residuos de baterías hasta 2050* [Memoria de Título]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- López Hernández, V., Hilbert, I., Gascón Castillero, L., Manhart, A., García, D., Nkongdem, B., Dumitrescu, R., Sucre, C., & Ferreira Herrera, C. (2024). *Reciclaje y reúso de baterías de litio en América Latina y el*

*Caribe: revisión analítica de prácticas globales y regionales* (inf. téc.)  
(Nota técnica del BID). Banco Interamericano de Desarrollo (BID). <https://doi.org/10.18235/0005660>

Ministerio de Energía. (2021). Estrategia Nacional de Electromovilidad [Gobierno de Chile]. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia\\_nacional\\_de\\_electromovilidad\\_2021\\_0.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_electromovilidad_2021_0.pdf)

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2025). Resolución Exenta N.º 649/2025: Determina valor de compra para subsidio en programa de renovación de taxis colectivos eléctricos [Gobierno de Chile, publicada el 7 de mayo de 2025]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1211555&idVersion=2025-03-05>

Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Ley N.º 20.920: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>

Ministerio del Medio Ambiente. (2022a). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990–2020: Resumen de puntos clave [División de Cambio Climático, Ministerio del Medio Ambiente]. [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/11/2022\\_Puntosclave\\_INGEI.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/11/2022_Puntosclave_INGEI.pdf)

- Ministerio del Medio Ambiente. (2022b). Reglamento que regula el movimiento transfronterizo de residuos [Gobierno de Chile, publicado en el Diario Oficial el 9 de agosto de 2022]. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/08/Reglamento-que-regula-el-movimiento-transfronterizo-de-residuos.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2024). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile. [https://snichile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/03/2024\\_DIN\\_CL.pdf](https://snichile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/03/2024_DIN_CL.pdf)
- Ministerio del Medio Ambiente. (2025). Anteproyecto de actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) 2025. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/02/Anteproyecto-NDC-2025-anexos.pdf>
- Programa Ecomovilidad. (2025). Bases para la Economía Circular de Baterías de Ion-Litio en Electromovilidad. <https://www.ecomovilidad.cl/wp-content/uploads/2025/04/BASES-PARA-LA-ECONOMIA-CIRCULAR-DE-BATERIAS-DE-ION-LITIO-EN-ELECTROMOVILIDAD.pdf>
- Red Metropolitana de Movilidad. (2025). Red Movilidad supera los 3.000 buses eléctricos y alcanza la mejor evaluación ciudadana en su historia. <https://www.redmovilidad.cl/>

[//www.red.cl/red-comunica/red-movilidad-supera-los-3-000-buses-electricos-y-alcanza-la-mejor-evaluacion-ciudadana-en-su-historia](http://www.red.cl/red-comunica/red-movilidad-supera-los-3-000-buses-electricos-y-alcanza-la-mejor-evaluacion-ciudadana-en-su-historia)

Servicio de Impuestos Internos. (2021). Resolución Exenta N.º 56: Depreciación acelerada para vehículos eléctricos e híbridos con recarga exterior [Publicada en el Diario Oficial el 28 de mayo de 2021]. <https://www.sii.cl/normativa-legislacion/resoluciones/2021/reso56.pdf>

Universidad de los Andes. (2025). Investigación con IA para diagnóstico de baterías fuera de uso. <https://www.uandes.cl/noticias/investigacion-busca-dar-segunda-vida-a-baterias-de-litio-de-autos-electricos/>

U.S. Department of Energy, ReCell Center. (2025). ReCell Center — Advanced Battery Recycling R&D. <https://recellcenter.org/>

USACH. (2024). Costo estimado de baterías de segunda vida y aplicaciones en Chile. <https://www.usach.cl/news/usach-se-adjudica-proyecto-corfo-4-millones-dolares>

## 9. Anexos

### 9.1. Anexo A: Proyecciones anuales de generación de BFU

**Tabla 9.1:** Proyección anual en toneladas de generación de baterías fuera de uso (BFU) gestionadas en Chile por escenario (2025–2060).

Año	Escenario PES (ton)	Escenario BASE (ton)	Escenario OPT (ton)
2025	25.9	–	–
2026	29.1	39.8	–
2027	43.4	48.3	44.7
2028	547.1	74.4	60.1
2029	868.0	723.8	96.6
2030	1187.6	1263.5	985.7
2031	1483.1	1791.1	1751.0
2032	6473.4	2336.3	2652.0
2033	7489.5	8889.5	3664.4
2034	8701.5	10969.6	12929.6
2035	10198.7	13473.9	17376.9
2036	12071.8	16549.5	22786.7
<i>Continúa en la siguiente página</i>			

**Tabla 9.1:** Proyección anual en toneladas de generación de baterías fuera de uso (BFU) gestionadas en Chile por escenario (2025–2060) (continuación)

<b>Año</b>	<b>Escenario PES (ton)</b>	<b>Escenario BASE (ton)</b>	<b>Escenario OPT (ton)</b>
2037	14395.4	20346.8	29436.5
2038	17257.7	25023.0	37510.6
2039	20845.6	30757.5	47413.9
2040	25294.5	37866.6	59529.7
2041	30756.9	46624.1	74451.1
2042	37581.1	57459.4	92762.6
2043	46058.7	70877.6	116926.6
2044	54671.1	87439.2	146823.6
2045	65398.7	107968.4	183728.1
2046	78679.3	133437.8	247583.1
2047	94604.3	164945.7	326083.3
2048	114586.7	202601.4	422498.6
2049	139656.9	249415.5	533531.8
<i>Continúa en la siguiente página</i>			

**Tabla 9.1:** Proyección anual en toneladas de generación de baterías fuera de uso (BFU) gestionadas en Chile por escenario (2025–2060) (continuación)

<b>Año</b>	<b>Escenario PES (ton)</b>	<b>Escenario BASE (ton)</b>	<b>Escenario OPT (ton)</b>
2050	152976.0	307665.6	668071.2
2051	171864.0	357147.4	831525.8
2052	198080.6	419112.2	996836.2
2053	233824.6	496870.9	1191427.5
2054	278671.2	594701.6	1418750.5
2055	339893.2	718004.6	1687182.1
2056	425830.6	873021.2	2041969.2
2057	494146.5	1068809.0	2470374.1
2058	622434.8	1172993.3	2992274.6
2059	785324.2	1450219.3	3023468.4
2060	–	1801150.9	3674244.5
2061	–	–	4479226.5

*Fuente: Elaboración propia.*

## 9.2. Anexo B: Carta Gantt

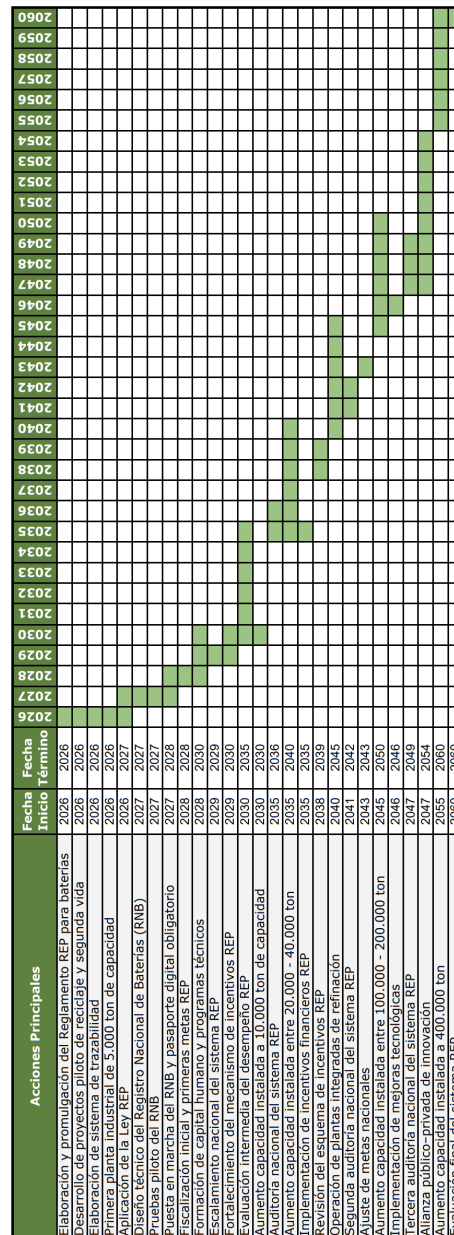


Figura 9.1: Carta Gantt de la gestión de baterías fuera de uso (2026–2060).