

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Maestría en Ingeniería de Productos y Procesos



**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CALCULAR EL PUNTO DE EQUILIBRIO DE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE RECICLAJE POR SEPARACIÓN MECÁNICA DE BATERÍAS
AUTOMOTRICES DE ION DE LITIO EN MÉXICO.**

Trabajo recepcional que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de
Productos y Procesos

Presenta: Ing. Andrea Paola Mora Sánchez.

Tutor: Dr. Julián Fernando Ordoñez

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. diciembre de 2025.

Contenido

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CALCULAR EL PUNTO DE EQUILIBRIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE RECICLAJE POR SEPARACIÓN MECÁNICA DE BATERÍAS AUTOMOTRICES DE ION DE LITIO EN MÉXICO.	1
Agradecimientos	6
Resumen	7
Abstract	8
1. Fundamentación del trabajo.....	9
1.1. Identificación y caracterización del problema a atender.....	9
1.2 Contexto Mundial.....	10
1.3 Contexto del Nacional.	12
1.4 Análisis causa-efecto	13
1.5 Matriz de marco lógico del problema	14
1.6 Objetivos de la investigación.....	15
1.8 Justificación y pertinencia del trabajo.....	16
2. Marco conceptual	18
2.1. Descarbonización.	18
2.1.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	20
2.2 Tipos de vehículos eléctricos.....	21
Solo con motor eléctrico (<i>Battery Electric Vehicules</i> o <i>BEV</i>).....	22
Vehículos híbrido eléctrico (<i>HEV, Hybrid Electric Vehicule</i>).....	22
Vehículos híbrido enchufable (<i>PHEV, Plug- In Hybrid</i>).....	24
2.3 Tipos de baterías de Ion litio	25
2.4 Procesos de Reciclaje y sus Características.	28
2.4.1 Proceso de pretratamiento y separación mecánica	29
2.4.2 Proceso pirometalúrgico.	32
2.4.3 Proceso hidrometalúrgico.	35
3.Soluciones conceptuales e ingeniería previa	37
3.1 Etapa 1: definición la población.	39

3.1.1. Proyección de ventas.	39
3.1.2 Definición del techo de crecimiento del parque vehicular de autos eléctricos.	41
3.1.3 Calculo de celdas de Ion Litio para la venta de tiempo.	42
3.2. Etapa 2. Proyecto detallado.	43
3.2.1 Características de la planta	43
3.2.2 Costos totales	44
3.3 Procesamiento.....	45
3.3.1 Determinar el porcentaje de materiales recuperados:	45
3.3.2 Ganancias potenciales.....	45
3.4 Viabilidad.....	46
4. Estrategia de desarrollo de ingeniería de detalle.....	46
4.1. Justificación de la estrategia metodológica o de intervención/investigación	46
4.1.1. Consideraciones costo/beneficio de la estrategia	47
4.2. Herramientas e instrumentos	47
4.3. Muestra o sujetos de investigación	48
4.4. Etapas del proceso de aplicación de la intervención/investigación	49
4.4.1. Cronograma de trabajo	50
4.4.2. Plan de manejo de riesgos	50
4.5. Metas de información	52
5. Exposición y análisis de resultados y hallazgos.....	53
5.1 Etapa 1: definición la población.	53
5.1.1. Proyección de ventas.	53
5.1.2 Definición del techo de crecimiento del parque vehicular de autos eléctricos.	58
5.1.3 Calculo de celdas de Ion Litio para la venta de tiempo.	62
5.2. Etapa 2. Proyecto detallado.	64
5.2.1 Características de la planta	64
5.2.2 Costos totales	67
5.3 Procesamiento.....	76
5.3.1 Determinar el porcentaje de materiales recuperados:	76
5.3.2 Ganancias potenciales.....	78
5.4 Viabilidad.....	81
6. Discusión final	83

6.1. Consecuencias de la aplicación de la estrategia de innovación.....	83
6.1.1. Aspectos de mejora para intervenciones subsecuentes.....	83
6.2. Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso.....	84
Referencias bibliográficas.....	85
Índice de tablas.....	89
Índice de Figuras	91
Índice de Ecuaciones	92

Agradecimientos

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto de obtención de grado de maestría. A mis profesores, asesores y coordinador, y de manera especial a mi tutor, el Dr. Julián Fernando Ordoñez Durán, mi más sincero reconocimiento por su apoyo, guía, exigencia académica y la confianza brindada en cada etapa de esta investigación.

A mis compañeros, gracias por sus ideas y discusiones que enriquecieron de manera significativa este trabajo.

A mi familia y seres queridos, quienes me acompañaron con paciencia y amor en cada momento, agradezco sus palabras de aliento y la celebración de cada logro que me motivó a continuar. En especial, a mi madre, Elizabeth Mora, por impulsarme desde el inicio de mi vida y acompañarme en cada paso del camino hasta llegar a este momento.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que me apoyaron de manera indirecta, así como a Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa. Muchas gracias; este logro también es suyo.

Resumen

Este proyecto desarrolla una metodología para evaluar la viabilidad económica de implementar una planta de reciclaje de baterías de ion-litio provenientes de vehículos eléctricos. El análisis parte del comportamiento histórico de las ventas de la región que se desea estudiar, en este caso México, con el fin de estimar el volumen potencial de baterías en etapa de descarte y, a partir de ello, valorar su viabilidad desde una perspectiva nacional.

La metodología propuesta se valida mediante la comparación de costos operativos y de inversión de una planta de reciclaje del tipo separación mecánica y los ingresos potenciales derivados de la recuperación de materiales de alto valor como lo es la *black mass* y otros elementos. Para su desarrollo se realizó una investigación sustentada en los principios de la ingeniería conceptual con un marco de referencia mundial, con el objetivo de obtener estimaciones de costos y recuperaciones del proceso. Con esta información se construyó un análisis de viabilidad económica donde se muestra la comparación entre el costo de procesos las baterías dentro de la venta de tiempo acotadas y las ganancias recuperadas, para determinar la viabilidad de implementar una planta de reciclaje por separación mecánica en México.

Palabras claves: sustentabilidad, descarbonización, autos eléctricos, baterías ion litio, reciclaje, costos, viabilidad, análisis.

Abstract¹

This project develops a methodology to evaluate the economic feasibility of implementing a lithium-ion battery recycling plant for electric vehicles. The analysis begins with the historical sales trends of the region under study, in this case Mexico, to estimate the potential volume of batteries at the end of their lifecycle and, based on this, assess its viability from a national perspective.

The proposed methodology is validated by comparing the operating and investment costs of a mechanical separation recycling plant with the potential revenue derived from the recovery of high-value materials such as black mass and other elements. Its development involved research based on the principles of conceptual engineering within a global framework, with the objective of obtaining cost and recovery estimates for the process. Using this information, an economic feasibility analysis was constructed, comparing the cost of processing batteries within a defined sales timeframe with the recovered revenue, to determine the viability of implementing a mechanical separation recycling plant in Mexico.

Keywords: sustainability, decarbonization, electric cars, lithium-ion batteries, recycling, costs, feasibility, analysis.

1. Fundamentación del trabajo

1.1. Identificación y caracterización del problema a atender

Se tiene conocimiento de que la electromovilidad en México y en el mundo ha ido en crecimiento y así continuará, con la intención de abonar a la meta de reducir el calentamiento global y las emisiones de carbono al 0% para el 2030 a nivel global (ONU, 2021). Sin embargo, no puede ignorarse que, para responder a esta creciente demanda, debe hacerse desde una perspectiva más sustentable la fabricación de las baterías y la obtención de la materia prima para su fabricación. Por esta razón el reciclaje de las baterías de Ion de Litio se encuentra en constante investigación, buscando formas de hacer el reciclaje más económico, más eficiente y estandarizado, ya que la principal intención del diseño de las baterías utilizadas en los autos eléctricos es su seguridad y eficiencia energética, no su fácil desmantelamiento y separación de materiales en un proceso de reciclaje.

En México no se cuenta con ninguna planta de reciclaje de separación mecánica para este tipo de residuo o algún plan para la disposición final las baterías en etapa de descarte, esto es lo que vuelve el tema del reciclaje de baterías de ion de litio en el país, pertinente para investigación, ya que no solo se busca hacer un análisis de viabilidad de implementar una planta de reciclaje en dentro de esta región, sino también mostrar la dimensión del problema desde una perspectiva nacional, acompañado de una propuesta metodológica mediante la cual pueda hacerse el análisis antes mencionado.

Para poder caracterizar el problema, es necesario incluir en la investigación los tipos de baterías de Ion de litio, mapeo de los procesos de reciclaje existentes, costos operativos de la planta y costos de implementación, porcentajes de materiales obtenidos y precios de venta de estos, desde la ingeniería conceptual. Esto para poder ver, como se mencionaba anteriormente, dónde sería el punto de equilibrio con relación al volumen, de hacer un sistema que permita el proceso de reciclado de baterías y si obtención de materiales valiosos, con una perspectiva nacional y mediante la propuesta de una metodología que pueda ser validada mediante una herramienta.

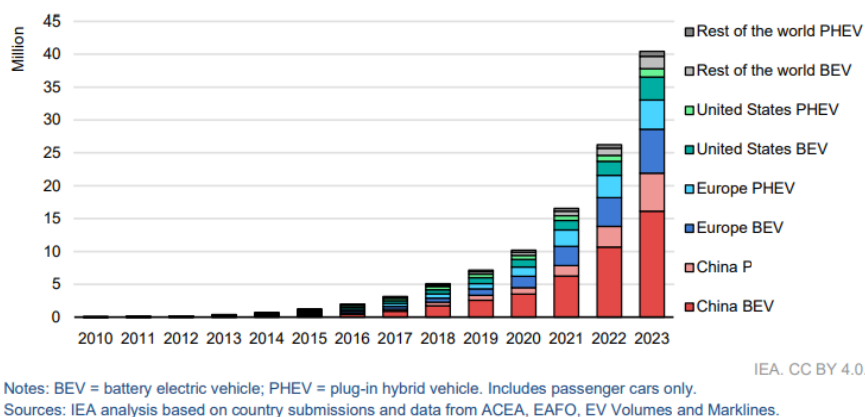
Lo anterior no solo genera información que hasta el momento no existe, sino una propuesta de cómo utilizar los datos, para generar resultados que sean analizados para cualquier parte interesada que busque implementar una planta dentro del país o en cualquier otro.

1.2 Contexto Mundial

Como se mencionó en el apartado anterior, en la carrera de reducir el calentamiento global, la electromovilidad es una de las estrategias que abonará para alcanzar la meta, y es aquí donde los autos eléctricos y las baterías de estos juegan un papel muy importante, llevando a que haya un aumento en la demanda de baterías de ion de litio y la compraventa de autos eléctricos.

El incremento en las ventas mundiales refleja esta tendencia, ya que ha ido en crecimiento en distintos países, tan solo en el 2023 las ventas de autos eléctricos fueron de alrededor de 14 millones, del cual el 95% de las ventas se encontró distribuido entre China, Europa y Estados Unidos. (The International Energy Agency (IEA), 2022). Como se muestra en **la figura 1** a continuación:

Figura 1. Tendencia global de existencias de auto eléctricos



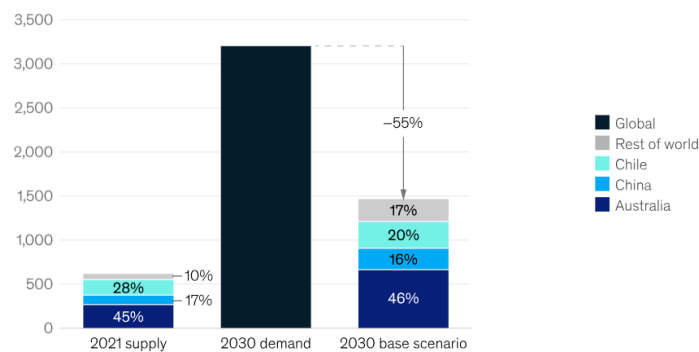
Nota: Crecimiento exponencial de las ventas de autos eléctricos, comparativa del año 2010 al 2023. Tomada de *Global EV Outlook*, por (International Energy Agency (IEA), 2024).

El aumento en las ventas de los autos eléctricos ha llevado a que la demanda de baterías vaya en un acelerado crecimiento, y ha sido reflejado en distintos análisis, uno de ellos realizado por la empresa de consultoría global McKinsey & Company, *“Battery 2030: Resilient, sustainable and circular”* el cual menciona que, entre 2022 a 2030 habrá un crecimiento del 30% por cada

año en la demanda de las baterías de Ion de Litio. (Mckinsey & Company, 2023). Para poder responder a esta demanda habrá que reducir los costos en la fabricación de las baterías de Ion de litio y las cantidades de materia prima obtenida directamente de la naturaleza, que requieren estos procesos de fabricación, buscando recurrir a la demanda secundaria (materiales obtenidos de los procesos de reciclaje), ya que todo recurso natural es finito.

Los principales y más valiosos materiales presentes en las baterías son: el litio, níquel, cobalto y manganeso. Y de acuerdo con el análisis sobre las baterías en el 2030 por empresa de consultoría antes mencionada, estos 4 elementos presentarán escasez debido a la alta demanda. El litio es el recurso natural que presentará la escasez más notable, como se observa en la **figura 2**, la cual compara el escenario de abastecimiento para 2030 contra la demanda global estimada de litio. (McKinsey & Company, 2023).

Figura 2. Demanda de litio en el 2030.



Nota: La imagen muestra que para el 2030, habrá una deficiencia del 55% en la demanda del litio comparado con el escenario de abastecimiento proyectado al 2030. Tomada de *Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular*, por (McKinsey & Company, 2023)

Una deficiencia tan significativa en el abastecimiento de litio hacia 2030 evidencia la urgencia de replantear el consumo y recuperación de materiales en la industria de las baterías. Este desequilibrio entre oferta y demanda no solo subraya la dependencia global de recursos finitos, sino que también refuerza la necesidad de desarrollar estrategias de reciclaje que permitan recuperar materiales valiosos y reducir la presión sobre la extracción primaria. Bajo este escenario, resulta indispensable analizar cómo estas dinámicas globales se reflejan en contextos específicos, como el caso mexicano, donde el crecimiento del mercado de vehículos eléctricos implica una futura generación de baterías en etapa de descarte. A continuación, se presenta el

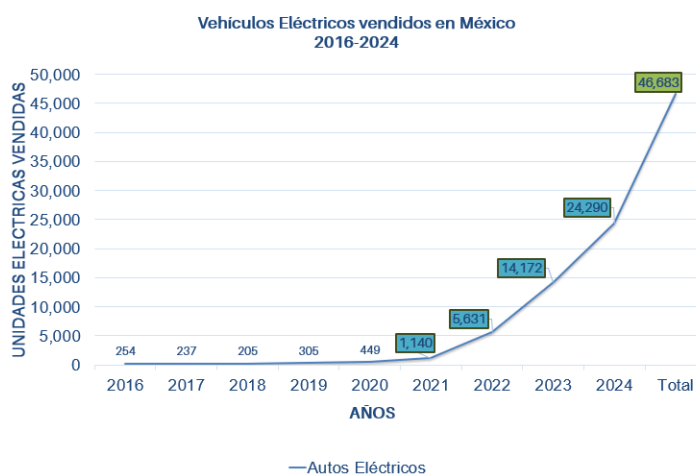
contexto nacional que permitirá comprender la magnitud del desafío y la oportunidad para el desarrollo de infraestructura de reciclaje en México.

1.3 Contexto del Nacional.

En la industria automotriz a nivel mundial, se ha observado un crecimiento hasta del 100% en la fabricación de autos eléctricos (Deloitte,2022) y México, a pesar de que se encuentra en un mercado emergente se espera que tenga un crecimiento alto, debido al *nearshoring* y su cercanía con Estados Unidos, país que es el segundo consumidor de autos a nivel mundial, después de China (Statista, 2022).

Del año 2016 al 2024, en México se existen 46,683 , unidades vendidas de autos eléctricos según (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024), mismas que cuentan con baterías de ion de litio y que llegarán al final de su vida útil entre 8 y 10 años después de su primer uso, según las garantías del fabricante (BYD, 2024). Estas unidades comenzarán su etapa de descarte, alrededor del año 2026, y como se mencionaba al inicio de trabajo, no se cuenta con sistemas nacionales de reciclaje para procesar las unidades en descarte o información relacionada al comportamiento de este tema dentro del país. En la **figura 3**, se observa como las ventas del 2021 al 2024, presentan un crecimiento sostenido, aquí se puede observar el mismo crecimiento acelerado que en el contexto mundial.

Figura 3. Ventas de autos eléctricos del año 2016 a 2023 en México.



Nota: El gráfico muestra la variación de ventas de un año a otro, resaltando en azul la tendencia de un crecimiento sostenido de las mismas desde el año 2021. Adaptado de *Históricos de ventas de autos eléctricos en México*, por (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024).

Es importante comenzar a proponer soluciones desde el panorama nacional de cómo puede hacerse la disposición final de estas baterías y contribuir cómo país al reciclaje y reducción de uso de materia prima virgen en la fabricación de nuevas baterías, y que estas propuestas impulsen la economía y el crecimiento de oportunidades laborales dentro del país.

Este trabajo buscará analizar a partir de qué punto es viable implementar una planta de reciclaje por separación mecánica en México, basándose en los históricos de ventas y en información existente relacionada a los procesos de reciclaje y recuperación de materiales valiosos, en un contexto comparativo internacional.

1.4 Análisis causa-efecto

A continuación, en la **tabla 1** se muestra un análisis de las causas y consecuencias alrededor del problema previamente caracterizado en el **apartado 1.1**:

Tabla 1. Análisis causa- efecto relacionada al problema relacionado con la presencia de baterías ion litio automotrices en México.

Categoría	Contenido
Problema	Debido al aumento proyectado de baterías de ion litio que se acercan a su fin de vida útil, con las implicaciones socioambientales que conlleva la ausencia de un proceso de disposición final para las baterías de autos eléctricos vendidos, se observa la necesidad de proponer soluciones técnicas que atiendan esta necesidad desde una perspectiva nacional.
Causas	- La electromovilidad es una de las estrategias para reducir el calentamiento global. - Incremento en la venta y demanda de autos eléctricos, en México y el mundo. - Incremento en la demanda y fabricación de baterías de ion de litio, para responder al crecimiento esperado de ventas de autos eléctricos a nivel global. - Incremento de marcas chinas y autos eléctricos en el mercado mexicano. - No hay información en la bibliografía actual relacionada al reciclaje de baterías de ion de litio.
Efectos	- Mayor probabilidad de una gestión inapropiada de estos residuos, causando consecuencias sociales y medioambientales en México. - El fabricante tiene el control de la disposición final de las baterías en etapa de descarte en el país y estas son enviadas fuera del mismo. - Falta de alternativas nacionales para participar y reducir los impactos ambientales que causa la creciente demanda de baterías de ion de litio. - Falta de educación social relacionada al manejo inapropiado de la gestión de residuos peligrosos provenientes de las baterías de ion litio.

Nota: Se toman las principales causas y efectos encontradas a lo largo del desarrollo de los capítulos anteriores.

Elaboración propia.

Con el apoyo de este análisis, se pueden buscar soluciones potenciales al problema. Como se puede observar en la tabla anterior, la falta de información relacionada el reciclaje de baterías abona a la problemática como una causa, y con base en esta se propone una solución metodológica más adelante.

1.5 Matriz de marco lógico del problema

La presente matriz de marco lógico permite estructurar de forma clara y estratégica el objetivo de reducir el impacto ambiental derivado de la disposición inadecuada de baterías de ion de litio en México.

Tabla 2. Matriz de marco lógico

Resumen Narrativo	Indicadores	Medios de Verificación	Supuestos
Reducir el impacto ambiental causado por la disposición inadecuada de baterías de ion de litio en México.	Volumen total de celdas reciclaje para su posible con base en históricos	Reportes del INEGI	Interés gubernamental y empresarial en soluciones sostenibles.
Determinar la viabilidad de instalar una planta nacional de reciclaje de baterías.	Estudio de viabilidad completado y validado.	Documento técnico final y validación por expertos.	Acceso a datos técnicos y colaboración de actores clave.
Resultados			
1. Diagnóstico del problema y contexto.	Análisis del mercado y volumen de baterías en México.	Datos del INEGI, IEA, McKinsey.	Información actualizada y confiable.
2. Identificación de tecnologías de reciclaje.	Mapeo de procesos internacionales.	Revisión bibliográfica y técnica.	Acceso a estudios internacionales.
3. Propuesta metodológica para análisis de viabilidad.	Metodología definida y aplicable.	Documento técnico y simulación.	Viabilidad de pruebas o estudios piloto.
Actividades clave			

- Recopilar datos sobre baterías y ventas.	Base de datos construida.	INEGI, fabricantes.	Disponibilidad de información técnica.
- Analizar procesos de reciclaje actuales.	Documento comparativo.	Fuentes académicas y técnicas.	Acceso a información internacional.
- Diseñar y validar metodología.	Herramienta funcional.	Validación con expertos.	Tiempo y recursos suficientes.

Nota: Elaboración propia.

A través de indicadores medibles, fuentes de verificación confiables y supuestos realistas, se establece una ruta crítica para evaluar la viabilidad de una planta nacional de reciclaje. Los resultados esperados —desde el diagnóstico del problema hasta la propuesta metodológica— proporcionan una base para sustentar decisiones técnicas, políticas y de inversión. Las actividades clave están alineadas con los objetivos y responden a la necesidad urgente de implementar soluciones sostenibles, aprovechando información técnica, académica e industrial. En conjunto, este marco constituye una herramienta útil para guiar el análisis de factibilidad y fomentar la colaboración multisectorial necesaria para una transición hacia una gestión responsable de residuos tecnológicos en el país

1.6 Objetivos de la investigación.

Objetivo general.

Analizar la viabilidad económica de implementar un sistema de reciclaje, de baterías de ion de litio en México, mediante un proceso de separación mecánica, con el fin de determinar el punto de equilibrio en función del volumen de baterías en su fin de vida útil.

Objetivos específicos.

1. Caracterizar la cantidad de baterías de ion de litio en etapa de descarte en México, para el periodo 2025-2035, mediante la proyección de ventas de vehículos eléctricos y su ciclo de vida útil.
2. Determinar la proyección de costo de una planta de reciclaje de baterías ion litio, considerando costos de implementación, operación y preparación de materiales.

3. Realizar un análisis de las ganancias potenciales obtenidas del procesamiento de los materiales valiosos, obtenidos mediante el reciclaje de las baterías disponibles.

1.8 Justificación y pertinencia del trabajo

Es evidente que la presencia de los autos eléctricos en el mundo y en México ha tenido un crecimiento constante a lo largo del siglo XXI como se puede observar en la **tabla 3** lo que representa un nuevo paradigma, la relación entre la consecución de materiales vírgenes o el reaprovechamiento de aquellos que llegan a final de vida útil, teniendo en cuenta que estas unidades de autos vendidas alcanzarán su fin de vida útil en entre 8 y 10 años después de su venta, es necesario proyectar un plan para su disposición final ya que en el país no cuenta con sistemas de reciclaje activos o de encadenamiento productivo para este producto.

Tabla 3. Comparativa de unidades eléctricas vendidas en México y el mundo.

Año	México (unidades)	Mundo (millones)	Participación de México (%)
2016	254	0.76	0.03%
2017	352	1.18	0.03%
2018	395	2.06	0.02%
2019	410	2.08	0.02%
2020	450	2.98	0.02%
2021	1,140	6.6	0.02%
2022	5,618	10.2	0.06%
2023	14,045	13.8	0.10%
2024	31,293	17.1	0.18%

Nota: Elaboración propia.

También es necesario evidenciar que la tendencia al crecimiento en la venta de autos eléctricos seguirá siendo constante, como se muestra en la **tabla 4**.

Tabla 4. Estimación de existencias por tipo de vehículo al 2050

Tipo de Vehículo	Estimación de Existencias (millones)	Participación Aproximada (%)	Notas
Vehículos Eléctricos de Batería (BEV)	~900	~52%	Se espera que dominen el mercado, impulsados por políticas de cero emisiones.

Híbridos Enchufables (PHEV)	~150	~9%	Actuarán como puente en regiones con infraestructura de carga limitada.
Híbridos no enchufables (HEV)	~100	~6%	Su participación disminuirá en favor de BEV.
Gasolina (ICE)	~300	~17%	En declive, mantenidos en uso en países en desarrollo y flotas antiguas.
Diésel (ICE)	~80	~5%	Reducción drástica por restricciones ambientales, excepto en vehículos pesados.
Gas Natural Comprimido (GNC)	~50	~3%	Estable o en ligera reducción.
Gas Licuado de Petróleo (GLP)	~30	~2%	Reducción progresiva por falta de sostenibilidad a largo plazo.
Hidrógeno (FCEV)	~80	~5%	Se espera expansión moderada, sobre todo en transporte pesado y regiones específicas.
Otros (biocombustibles, etc.)	~20	~1%	Uso marginal, enfocado en nichos o mercados rurales.
Total Estimado	~1,710	100%	Suponiendo un parque estable con recambios tecnológicos.

Nota: Adaptada de, *Global EV Outlook*, por (IEA, 2024)

El creciente déficit proyectado en la de materiales utilizados en la fabricación de baterías para las próximas décadas, impulsado por la acelerada demanda de tecnologías limpias como los vehículos eléctricos y las energías renovables, plantea un desafío crítico para la sostenibilidad de la transición energética. Elementos como el neodimio, disprosio y otros componentes esenciales en motores eléctricos y baterías de ion de litio están cada vez más expuestos a riesgos de escasez, geopolítica y altos impactos ambientales derivados de su extracción. En este contexto, el reciclaje de baterías automotrices surge no solo como una estrategia viable para recuperar materiales estratégicos, sino también como una necesidad imperativa para reducir la presión sobre fuentes primarias, disminuir la huella ambiental del sector y fortalecer la seguridad de suministro de insumos clave para la movilidad eléctrica. Esta situación justifica plenamente el desarrollo de una investigación orientada al análisis, viabilidad y aplicación de procesos de reciclaje de baterías en contextos emergentes como el mexicano.

2. Marco conceptual

En el presente capítulo presenta conceptos relacionados al desarrollo del proyecto y que serán aplicados más adelante para la metodología propuesta. Estos conceptos son consultados únicamente en fuentes bibliográfica verificables y se presentan de la siguiente manera.

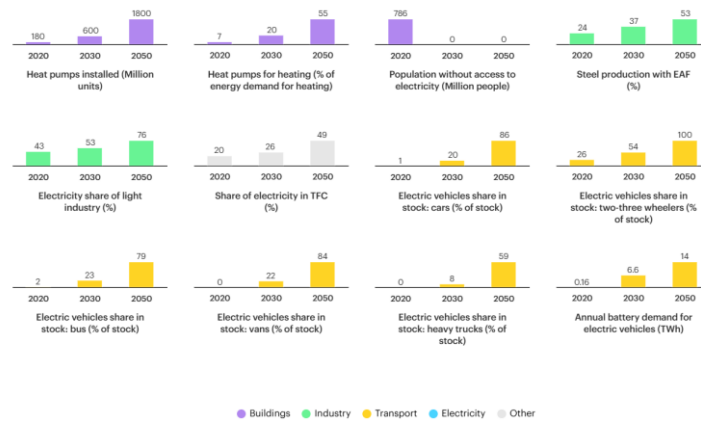
2.1. Descarbonización.

Desde el enfoque de la sostenibilidad, la descarbonización busca reducir y eliminar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) generados por actividades humanas, principalmente en los sectores energético, industrial y de transporte. Buscando mitigar el cambio climático, y promover un desarrollo económico con más responsabilidad social y ambiental. La descarbonización no solo considera cambiar fuentes de energía fósil por renovables, sino también cambios en los modelos de producción, consumo, movilidad y gestión de residuos (Agencia Internacional de la Energía (AIE), 2021)

En la búsqueda de alcanzar el cero neto de emisiones de dióxido de carbono para el 2050, la electromovilidad juega un papel muy importante, especialmente los vehículos eléctricos. En el estudio *“Net Zero by 2050, a Routmap for the Global Energy Sector”* realizado por (Agencia Internacional de la Energía (AIE), 2021), se menciona que la electrificación, seguirá creciendo con la intención de seguir reduciendo el uso de combustibles fósiles y promover el uso de tecnologías más limpias. En este caso de estudio se hace evidente la tendencia de crecimiento relacionada al transporte, incluyendo específicamente la relacionada a los autos eléctricos y a la demanda de las baterías para estos.

Como se observa en la **figura 4**, el *stock* de autos eléctricos y la demanda de las baterías tiene un crecimiento exponencial, misma que necesita ser atendida desde una perspectiva sustentable que siga abonando a la descarbonización.

Figura 4. Electrificación, tendencias de tecnologías para el año 2050



Nota: Tomado de Net Zero by 2050 por, (Agencia Internacional de la Energía (AIE), 2021)

Como lo menciona Chingu (2024), el reciclaje de las baterías de ion litio abona a la descarbonización desde una perspectiva sustentable de la siguiente manera:

- La necesidad de atender la demanda creciente y acelerada de fabricación de autos eléctricos y sus baterías, puede tener una alternativa más sustentable, al obtener la materia prima del reciclaje, sin explotar de forma desmedida los recursos naturales
- El reciclaje puede ayudar a disminuir el costo de las baterías, ya que, al haber más materia prima disponible, proveniente del reciclaje, los costos de esta pueden disminuir, impactando el costo total de vehículo.
- Al responder a la demanda antes mencionada, se sigue impulsando la electromovilidad, misma que reduce el uso de combustibles fósiles.
- Proponer sistemas de reciclaje alrededor del mundo, reduce la probabilidad de contaminación del medio ambiente y daños a la sociedad por una incorrecta disposición final de las baterías.

Teniendo en cuenta lo anterior es por lo que es pertinente para el presente trabajo relacionarlo con los conceptos de Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, presentados en el siguiente subtema.

2.1.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son un conjunto de 17 objetivos, adoptados por los miembros de las naciones unidas, que están comprometidos con la búsqueda de erradicar la pobreza, proteger al planeta y asegurar la prosperidad de la humanidad. Estos objetivos fueron aprobados en 2015 como parte de la Agenda 2030, y se pueden observar en la **figura 5** (ONU, 2024).

Figura 5. Detalle de los ODS



Nota: En la figura anterior se muestran los 17 ODS, no se pretende relacionar todos con el presente trabajo solo se pone como una referencia, esto se explica más adelante. Tomado de, *Objetivos de desarrollo sostenible*, por (ONU, 2024)

De acuerdo con el enfoque de los ODS presentados en la figura anterior, se observa un interés particular en el ODS 12, el cual será presentado a continuación.

ODS numero 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

Busca que se utilicen los recursos naturales de forma más eficiente, una gestión de residuos industriales apropiada, minimizar los impactos ambientales que engloban todo el ciclo de vida del producto. (ONU, 2024)

Sus principales metas son:

- 12.2: Gestión sostenible y uso eficiente de los recursos naturales.
- 12.3: Reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita a nivel mundial.
- 12.4: Lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y desechos.

- 12.5: Reducir significativamente la generación de desechos mediante la prevención, reducción, reciclado y reutilización.
- 12.6: Fomentar prácticas sostenibles en empresas, especialmente grandes e industriales.
- 12.8: Asegurar que las personas tengan información y conciencia sobre el desarrollo sostenible.

(López Hernández, 2024) , dice como el reciclaje de las baterías de ion litio abona a la meta 12.5 de la siguiente manera:

- Reduce la probabilidad de una gestión inapropiada de las baterías ion litio como residuo peligroso, evitando contaminación ambiental e impactos sociales al tener un ecosistema de reciclaje y recolección de estas
- Permite el aprovechamiento de materiales valiosos obtenidos del reciclaje, disminuyendo el uso de materia prima virgen en la fabricación de nuevas baterías.
- Fomenta la economía circular, ya que permite incorporar los materiales obtenidos en la fabricación nuevos productos, o incluso si se hace una apropiada gestión de aguas residuales, como lo es el caso de la hidrometalurgia, esta agua puede ser reutilizada en el mismo u otros procesos.

Desde este abordaje entonces, es necesario analizar el ecosistema automotriz eléctrico actual, que presenta en el siguiente apartado.

2.2 Tipos de vehículos eléctricos.

Existen distintos tipos de autos eléctricos que son clasificados de acuerdo con las características del motor o motores que tienen. Para efectos del presente trabajo se investigan las características de los autos: híbridos eléctricos, híbridos enchufables y con solo motor eléctrico (o también conocidos como puramente eléctricos).

En este tipo de vehículos, pueden encontrarse las baterías de Ion litio y sus variantes, como son las baterías NMC (níquel-manganeso-cobalto), LFP (litio ferro fosfato), NCA (níquel-cobalto-aluminio), etc. (US Department of Energy, 2024). Estos tipos de baterías serán explicadas en el **apartado 2.3** Tipos de batería de los vehículos eléctricos.

A continuación, se presentan los tipos de autos antes mencionado y algunas de sus características.

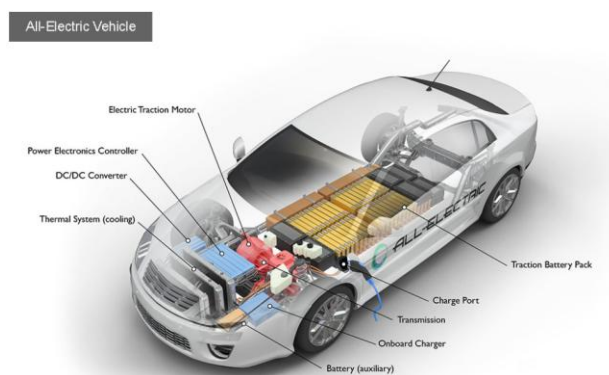
Solo con motor eléctrico (*Battery Electric Vehicules o BEV*)

Estos vehículos son también conocidos puramente eléctricos, cuentan con un solo motor del tipo eléctrico, que impulsa el tren motriz, funciona con corriente alterna y es alimentado por la batería, sin requerir combustible para su funcionamiento. La batería de este tipo de vehículos es de ion litio y solo puede recargarse al conectarse a una estación de carga diferencia de un auto hibrido eléctrico e hibrido enchufable, que sus baterías se pueden recargar con el frenado regenerativo (US Deparment of Energy, 2024)

Los vehículos con esta tecnología han tenido un crecimiento exponencial en sus ventas ya que tiene una eficiencia energética entre el 85% y 95%, lo cual disminuye el costo por consumo de combustible y las emisiones directas al medio ambiente. Sin embargo tienen limitaciones debido al tiempo de carga, ya que actualmente en algunas partes del mundo, la disponibilidad de estaciones de carga aún es baja. (US Deparment of Energy, 2024).

En la **figura 6**, se muestran los componentes principales de un auto eléctrico.

Figura 6. Componentes de un auto eléctrico



Nota: Esta imagen muestra como este tipo de vehículo cuenta con un solo motor a diferencia de los híbridos eléctricos e híbridos enchufables. Tomado de, *How Do Hybrid Electric Cars Work?* por (US Department of energy, 2025)

Vehículos híbrido eléctrico (*HEV, Hybrid Electric Vehicule*)

Estos tipos de automóviles combinan un motor de combustión interna y un motor eléctrico, los cuales tienen una interacción que varía dependiendo de la demanda al conducirlos o

su nivel de hibridación, este nivel puede ser en serie o paralelo (convencional) (US Department of energy, 2025).

A continuación, se explican características para ambos tipos.

a) El paralelo o convencional.

Ambos motores se encuentran conectados en paralelo e impulsan las ruedas de forma conjunta o separada como se muestra en la figura, según la demanda al conducirlo. En este tipo de auto, el motor que tiene la función regenerativa es el eléctrico, es decir, este motor se encarga de recargar las baterías al momento del frenado. Usualmente utilizan baterías de tipo NiHM (níquel-metal) o *Li-Ion* (ion litio) y por las condiciones variables de manejo y las condiciones de carga, la vida de la batería es variable. (US Department of energy, 2025)

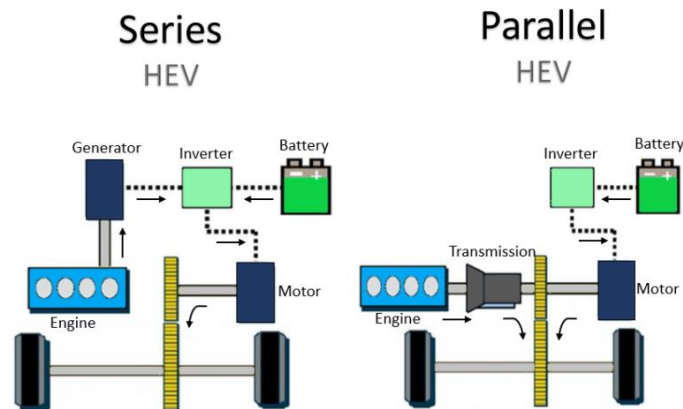
El motor de combustión, como se mencionó anteriormente sí está conectado al tren motriz pero no participa en la recarga de la batería. (US Department of Energy, 2025)

b) En serie.

Para este tipo, las ruedas son impulsadas únicamente por el motor eléctrico, mientras que el motor de combustión, no se encuentra conectado al tren motriz y se encarga de la producción de electricidad para el motor eléctrico y la recarga de las baterías. Su motor eléctrico también puede aprovechar el frenado regenerativo para recargar el paquete de baterías, por lo que no es enchufable. Utiliza el mismo tipo de baterías que un híbrido de tipo convencional. (US Department of Energy, 2025).

En la **figura 7** se muestran algunas diferencias entre las funciones de los tipos de híbridos eléctricos de forma gráfica y previamente mencionadas.

Figura 7. Comparativa del funcionamiento de un híbrido eléctrico convencional y en serie.



Nota: En la imagen se puede observar cómo en una estructura tipo serie solo el motor eléctrico se encuentra conectado al tren motriz y a la batería, mientras que en estructura paralela, el motor de combustión y el eléctrico se encuentran conectados al tren motriz. Tomado de, *Hybrid Electric Vehicle Type*, por (Shradha, 2021)

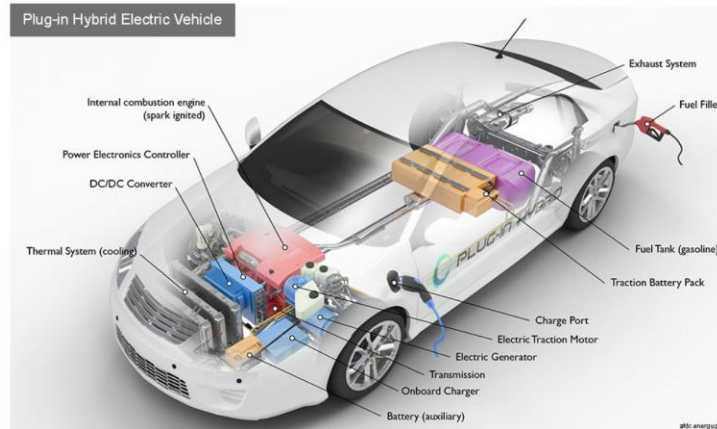
Vehículos híbrido enchufable (PHEV, Plug-In Hybrid)

Cuenta dos motores, uno eléctrico y uno de combustión interna, que interactúan de acuerdo con la demanda al conducirlo o las preferencias de carga del usuario, la diferencia entre este y un híbrido eléctrico, es que la batería tiene dos formas de carga, que se explican más adelante (US Department of Energy, 2025)

El motor de eléctrico es el que mueve el vehículo, impulsado por la carga de la batería, o en caso de que se agote la carga de esta, el motor de combustión trabaja en conjunto con el eléctrico. Esto permitiendo la carga de la batería nuevamente, por frenado regenerativo.

Otra forma de cargar la batería es enchufando el auto a la red eléctrica, ya que, al descargarse totalmente la batería, la eficiencia del auto puede disminuir, aun con el frenado regenerativo como medio de carga (US Department of Energy, 2025). En la siguiente **figura 8** se muestran los componentes de este tipo de vehículo.

Figura 8. Comparativa del funcionamiento de un híbrido eléctrico convencional y en serie.



Nota: En esta imagen se observa como este tipo de vehículo cuenta con los dos motores, al igual que auto híbrido eléctrico, con la diferencia de que este tipo de vehículo cuenta con un puerto de carga. Tomado de, *How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Work?*, por (US Department of Energy, 2025)

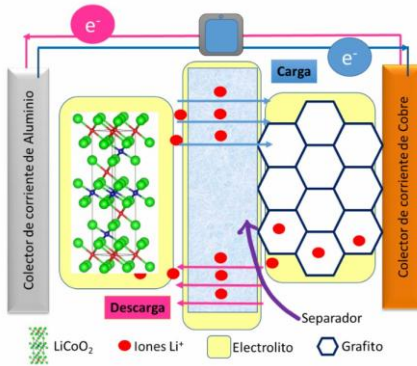
Una vez definidos los tipos de autos eléctricos y sus principales características, es necesario explicar las características de las baterías comerciales más comunes utilizadas en este tipo de vehículos, las cuales se presentan en el siguiente punto.

2.3 Tipos de baterías de Ion litio

Las baterías de Ion de Litio son las más usadas en los autos eléctricos, debido a que tienen una gran capacidad de almacenar energía y su peso es bastante bajo, lo que las hace ideales para ser utilizadas en las baterías de este tipo de autos. (MIDTRONICS, 2023).

A continuación, en la **figura 9**, se muestra el principio de funcionamiento de una celda eléctrica para sector automotriz.

Figura 9. Funcionamiento de una batería automotriz de Ion litio.



Nota: En esta imagen se observa como el proceso de carga y descarga de este tipo de baterías se da por el paso de los iones de litio a través del electrolito. Cuando viajan derecha a izquierda (del ánodo al cátodo) sucede la descarga y durante la carga el proceso se invierte. Tomado de, “Reciclaje de baterías de Ion-Li, una necesidad presente y futura”, por (Suarez, 2024)

Las baterías de ion litio son clasificadas de acuerdo con su composición química, en la **tabla 5**, se muestra de forma más detallada sus aplicaciones, ventajas y desventajas, donde se puede observar cuales son los tipos más usados en los autos eléctricos. (US Department of Energy, 2025)

Tabla 5. Ventajas, desventajas y principales aplicaciones de los tipos de baterías de Ion Litio.

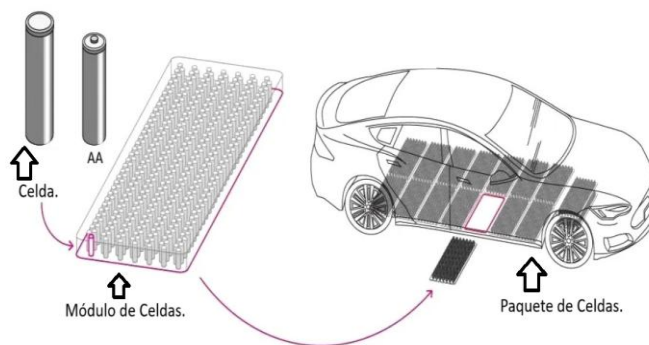
Tipo de batería	Composición química	Abreviatura	Ventajas principales	Desventajas	Aplicaciones comunes
LFP	Litio hierro fosfato	LiFePO_4	Alta seguridad, larga vida útil, buena estabilidad térmica	Menor densidad energética	Almacenamiento de energía estacionaria (por ejemplo: paneles solares). Autobuses eléctricos. Vehículos eléctricos.
NMC	Níquel manganeso cobalto.	$\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$	Buena densidad energética, balance entre coste, vida y potencia	Costo moderado, menor estabilidad térmica que LFP	Herramientas eléctricas. Bicicletas eléctricas Vehículos eléctricos (la más comunes en este tipo de vehículos)
NCA	Níquel cobalto aluminio	$\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$	Alta densidad energética, buena duración	Costosa, menor estabilidad térmica	Dispositivos médicos. Vehículos eléctricos, especialmente de alto rendimiento.

LCO	Litio cobalto	LiCoO_2	Alta densidad energética	Costosa, menos segura, vida útil corta	Celulares. Laptops. Cámaras No son comunes en VE
LMO	Litio manganeso	LiMn_2O_4	Buena seguridad, bajo costo	Menor vida útil y densidad energética	Almacenamiento de energía estacionaria (por ejemplo: paneles solares). Vehículos eléctricos.

Nota: Como se puede observar en la columna de aplicaciones, las baterías del tipo NMC, son la más utilizadas comúnmente en los autos eléctricos. Adaptado de “Reciclaje de baterías de Ion-Li, una necesidad presente y futura” por (Suarez, 2024) y “Alternative Fuels Data Center”, por (US Department of Energy, 2024)

Cuando se refiere a la batería del auto eléctrico, realmente se habla del paquete de celdas que se encuentra dentro del automóvil, como se muestra en la **figura 10**. Este está compuesto por celdas individuales que visualmente se podrían comparar con una pila AA Cada, y tiene su proceso de carga y descarga como se mostró en la figura 9.

Figura 10. Distribución de las celdas de un auto eléctrico.



Nota: Las celdas se encuentran contenidas en módulos y un auto eléctrico tiene un conjunto de módulos que también es conocido como paquete. Tomado de, “Which batteries is Tesla using in its models?”, por (MSG Equipment, 2023)

La cantidad de celdas por módulo varía dependiendo de la densidad energética que demande el vehículo y la forma que tengan las baterías, actualmente las más comerciales que se pueden encontrar en este tipo de vehículos son: cilíndricas, prismáticas o de bolsa (*Pouch*) (Yang, 2021), como se muestra en la **figura 11**.

Figura 11. Tipos de formas de las baterías de Ion Litio.



Nota: El formato más utilizado suele ser el prismático o cilindro. Tomado de, *¿Por qué formato apuestan los grandes fabricantes de celdas para baterías? ¿Prismáticas, cilíndricas o pouch?,* por (CIC ENERGI GUNE, 2025)

La cantidad de celdas que puede tener un auto eléctrico ha variado en los últimos 15 años oscilando desde 192 a 7,000 celdas, dependiendo del tipo de celda u automóvil como se muestra en la **tabla 6** (Nissan, 2011) y (EV database, 2023)

Tabla 6. Número de celdas por vehículo

Modelo	Tipo de celda	N.º aproximado de celdas	Peso aproximado de una celda
Nissan Leaf (40 kWh)	Prismáticas	192 celdas	50 g
Tesla Model 3 (Long Range)	Cilíndricas 2170	4,416 celdas	65 g
Tesla Model S (100 kWh)	Cilíndricas 18650	7,104 celdas	45 g

Nota: Tomado de, "Tesla Model 3" por (EV database, 2023) y (Nissan, 2011).

Una vez definido los tipos de batería, en el siguiente apartado encontramos los procesos de reciclaje más comunes para su procesamiento.

2.4 Procesos de Reciclaje y sus Características.

Como se mencionó anteriormente, el valor de los metales recuperados, la preservación de los recursos naturales, prevenir la contaminación ambiental relacionada a la incorrecta disposición final de las baterías de ion litio y la reducción del impacto ambiental causado por la fabricación estas, han sido factores que promueven el reciclaje, ya que no solo el litio es un material que puede recuperarse mediante estos procesos sino también el aluminio, cobalto, hierro manganeso y el níquel, lo cual permite disminuir el uso de materia prima virgen, en el proceso de fabricación de nuevas baterías. (Peters, 2015)

Existen distintos tipos de procesos para el reciclaje de las baterías de Ion litio, entre los principales están: separación mecánica, pirometalurgia e hidrometalurgia, los cuales se aplican individualmente o haciendo una mezcla entre ellos, y usualmente cualquiera de los antes mencionados, tiene como predecesor el proceso de pretratamiento. (Peters, 2015)

Para el desarrollo de la metodología que busca proponer el presente trabajo, es necesario investigar, desde la ingeniería conceptual (o preliminar) los siguientes aspectos de los procesos antes mencionados:

- Características del proceso: desde un nivel técnico y de detalle general.
- Maquinaria y sus costos: una investigación con un nivel detalle bajo, de las funciones y características de los equipos utilizados, así como de costos promedio de las máquinas utilizadas.
- Costo operativo del proceso: investigación del costo promedio total de procesar las celdas desde una perspectiva general, ya existente en la bibliografía.
- Ganancia potencial por recuperación de materiales: investigación del precio promedio de los materiales recuperados para cada proceso.

2.4.1 Proceso de pretratamiento y separación mecánica

- **Características del proceso.**

Esta etapa permite preparar las baterías o celdas para su posterior recuperación de materiales valiosos. A continuación se explican los detalles de este:

Durante el pretratamiento las baterías son descargadas y separadas de sus módulos, celdas y carcasa, para su posterior procesamiento (por separación mecánica, pirometalurgia y/o hidrometalurgia). Este proceso es muy importante ya que no solo facilita la manipulación de las baterías, sino que reduce el riesgo de explosiones (García, 2016).

El proceso de descarga puede realizarse sumergiendo las baterías en agua con hierro en polvo o mediante estaciones de descarga de baterías, al igual que la separación que puede darse por un proceso manual realizado por un operador o con robots de desarmado. (Gaines, Science Direct, 2018)

La desactivación o descarga puede omitirse, cuando las baterías van a ser descargadas dentro de otro tipo de proceso, como lo es en el caso de proceso pirometalúrgico explicado más adelante en (García, 2016).

Una vez que las baterías han pasado por su pretratamiento, son enviadas a su separación mecánica o física, proceso que consiste en la trituración de las celdas, convirtiéndolas en polvo para luego pasar a las siguientes etapas del proceso (Gaines, Science Direct, 2018)

1. Separación magnética: se separan los materiales ferrosos como lo son el hierro y el acero, que principalmente se encuentran en las carcasas.
2. Separación por aire: separa los materiales ligeros, como el plástico, papel y los separadores de la batería.
3. Separación por densidad: separa metales y polvos activos según su densidad, obteniendo la conocida masa negra o en inglés *Black mass* (contiene: litio, níquel, cobalto, manganeso y grafito) esta masa negra es la materia prima valiosa para un posterior procesamiento hidrometalúrgico o pirometalúrgicos.
4. Secado: elimina el electrolito residual, entregando un producto más seco.

Aunque el proceso de separación mecánica por sí solo no genera altas ganancias, es esencial para los procesos posteriores, además de que permite la recuperación de un material muy valioso como lo es la masa negra, antes mencionada. (Gaines, Science Direct, 2018)

De mismo modo afirma que este proceso tiene algunas ventajas como: que la maquinaria no es tan especializada comparado con un proceso pirometalúrgico o hidrometalúrgico y que su demanda energética es menor comparada con los procesos anteriores. (García, 2016)

- **Maquinaria y sus costos de implementación**

Aunque los costos pueden variar dependiendo del nivel de automatización de que se decida emplear para el proceso y la capacidad requerida de la planta de pretratamiento y separación mecánica (García, 2016). A continuación, en la **tabla 7**, se presentan los costos promedio según la bibliografía existentes (Lima, 2022)

Tabla 7. Costo promedio de la implementación de una planta chica a mediana

Aspecto	Monto en USD por año
Equipamiento (tritador, cribas, separadores magnéticos/gravimétricos, sistema de descarga/seguridad)	300,000 - 1,100,000
Obra civil y servicios (nave, cimentación, electricidad, HVAC, manejo de efluentes)	120,000 – 750,000
Instalación, ingeniería y puesta en marcha	75,000 – 450,000
Permisos, seguridad industrial y sistemas de mitigación de riesgos	40,000 – 300,000
Contingencia e imprevistos	50,000 – 600,000
Total estimado	500,000 – 3,000,000

Nota: Adaptado de “*Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries*”, por (Lima, 2022), Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2203>

Se puede observar un rango amplio ya que el monto específico dependerá de factores como:

- Nivel de automatización.
- Regulaciones ambientales y obligaciones del país.
- Escala de la planta.
- **Costo operativo total del proceso.**

El costo operativo total de una planta de separación mecánica para el reciclaje de baterías de ion de litio puede variar dependiendo de factores como la capacidad de procesamiento, la tecnología utilizada, el tamaño de la planta y el nivel de automatización. Sin embargo, en la bibliografía existente se muestran los siguientes costos operativos promedio, como se muestran en la **tabla 8**. (Lima, 2022),

Tabla 8. Costo promedio operativo para el proceso de separación mecánica.

Tamaño de planta	Capacidad mensual	Costo operativo mensual estimado	Costo estimado mensual de implementación
Pequeña	10 – 50 toneladas	\$50,000 – \$150,000 USD	\$0.8 millones- 4.0 millones USD
Mediana	50 – 500 toneladas	\$150,000 – \$500,000 USD	\$3-20 millones USD
Grande	500 – 2,000 toneladas	\$500,000 – \$2,000,000 USD	\$15-60 millones

Nota: Adaptado de “*Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries*”, por (Lima, 2022), Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2203>

Estos costos están relacionados a (Gaines, Science Direct, 2018) (Lima, 2022)

- Mano de obra
- Energía eléctrica
- Mantenimiento y repuestos
- Tratamiento de residuos
- Transporte y logística: de baterías y materiales reciclados
- Costos administrativos

- **Ganancia potencial por recuperación de materiales.**

La recuperación de materiales mediante separación mecánica de baterías de ion de litio depende del tipo de batería (NMC, LFP, LCO, etc.), en nivel de automatización y otros aspectos que no se pretenden analizar para el presente trabajo, por lo que se presentan estimaciones investigadas en la bibliografía existente (Chigbu, 2024)

Para motivos de esta investigación se toma como ejemplo el procesamiento por separación mecánica de las baterías de ion litio específicamente las del tipo NMC (Níquel, manganeso y cobalto), ya que son las más usadas en autos eléctricos (Granata, Ferreira, Petrides, 2020). En la siguiente **tabla 9** se muestran los datos antes mencionados:

Tabla 9. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso de separación mecánica.

Material	% Recuperado	Valor promedio (USD/kg)
<i>Black mass</i> (NMC, grafito)	30–40%	\$5–\$25
Aluminio	8–10%	\$2–\$5
Cobre	10–15%	\$8–\$10
Plásticos / Separadores	15–20%	~\$0 (valor bajo, no comercializable)
Acero / Hierro	5–10%	\$0.3 – \$0.5
Residuos / Electrolito	5–10%	No recuperable en mecánica

Nota: Adaptado de “Unlocking Economic and Environmental Gains Through Lithium-Ion Battery Recycling for Electric Vehicle”, por. (Chigbu, 2024).

2.4.2 Proceso pirometalúrgico.

- **Características del proceso.**

Este proceso se realiza introduciendo las baterías completas, en hornos que alcanzan altas temperaturas hasta fundirlas y obtener una aleación de metales como el cobre, níquel, cobalto y hierro.

Este proceso se realiza sin necesidad de haber clasificado posteriormente las baterías, sin embargo, esta etapa tiene un alto riesgo de explosión, por la exposición del electrolito a altas temperaturas, y es por esto por lo que es importante, dividir el proceso en dos etapas: primero exponer las baterías a una baja temperatura que evapore el electrolito y después fundir las baterías a una temperatura alta. Es durante esta última etapa donde las baterías son reducidas para facilitar la separación de los metales posteriormente mediante un proceso hidrometalúrgico (Yang, 2021)

Etapas del proceso: (Yang, 2021)

1. Precalentamiento: las baterías se calientan a temperaturas menores a 300 grados, es aquí donde hace la evaporación del electrolito, antes mencionada.
2. Pirolisis: con una temperatura de 700 grados, se hace la incineración del plástico, presente en estas baterías.
3. Reducción o fusión en horno: se funden las baterías hasta obtener la aleación (donde se encuentra el cobre, níquel, cobalto y hierro). En este proceso se pierden materiales como el litio, grafito y aluminio, ya sea en escoria o gases.

El proceso pirometalúrgico tiene una baja eficiencia en la recuperación de materiales orgánicos como el litio, aluminio y grafito, ya que los transforma en escoria o gases (García, 2016).

Como se mencionaba anteriormente, este proceso se realiza a altas temperaturas que oscilan entre los 300- 1,500 °C teniendo una alta eficiencia en la recuperación de metales valiosos y aceptando gran variedad de baterías de ion litio. Sin embargo, tiene una alta demanda energética y de emisiones de gases, por lo que sus costos ambientales son altos. También este proceso tiene una baja eficiencia en recuperación de materiales orgánicos como el Litio y otros materiales. (Guanma Machinery, 2025), por lo que considerar una implementación de una planta para este tipo de proceso requiere un análisis más detallado, para determinar si es viable para responder a las necesidades del contexto.

- **Características de la maquinaria y costos.**

Aunque este proceso actualmente en la industria es conocido e implementado con frecuencia, sus costos varían dependiendo de la tecnología implementada en la planta y la capacidad de esta. En la siguiente **tabla 10** se muestran el costo promedio. (Lima, 2022)

Tabla 10. Costo promedio de la maquinaria para el proceso de pirometalúrgico.

Máquina	Función	Costo USD
Horno de arco eléctrico	- Precalentamiento. - Pirolisis. - Reducción	\$ 1-5 millones Depende de la capacidad de procesamiento que va de 5 a 20 toneladas/día
Sistema de trituración	- Pretratamiento: en caso de no realizar el precalentamiento	\$150,000-500,000
Sistema de alimentación.	- Bandas transportadoras. - Alimentadores automáticos - Tolvas.	\$50,000- 200,000
Sistema de gestión de gases.	- Captura de gases tóxicos (HF, CO₂)	\$200,00- 800,000

Nota: Adaptado de “Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries”, (Lima, 2022), por, Recuperado de:

<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2203>

- **Costo operativo del proceso**

El costo operativo de una planta de reciclaje de baterías automotrices de ion-litio por proceso pirometalúrgico dependiendo de la escala de la planta, costos de energía, tipo de baterías tratadas, grado de automatización, etc. (Lima, 2022)

Como se ha mencionado en otros apartados para motivos de esta investigación se han tomado los costos promedio de la bibliografía existente, la cual menciona que aun con todas las variables antes mencionadas, se puede tomar un promedio de entre \$3,000 y \$8,000 dólares de costo operativo por cada tonelada procesada en este proceso (Gaines, Science direct, 2014).

Los costos operativos incluyen los siguientes aspectos, como se muestra en la **tabla 11** (Gaines, Science direct, 2014)

Tabla 11. Variables consideradas en el costo operativo de una planta de proceso pirometalúrgico.

Categoría	Descripción
Energía	Costos eléctricos y de combustibles para hornos y sistemas auxiliares. El proceso pirometalúrgico es intensivo en energía.
Mano de obra y mantenimiento	Incluye salarios del personal operativo, técnico y de seguridad, además del mantenimiento de hornos y equipos.
Gestión de gases y residuos	Tratamiento de gases tóxicos. escorias y cenizas

Nota: Adaptado de “*Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries*”, (Lima, 2022) y “*Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course*”, (Gaines, Science direct, 2014).

- **Ganancia potencial por recuperación de materiales.**

Teniendo en cuenta todas las variables a considerar, mencionada en el apartado anterior la bibliografía sugiere los siguientes porcentajes para la recuperación de materiales, así como su valor promedio, para el reciclaje del tipo de batería ion litio NMC, como se muestra en la **tabla 12** (Lima, 2022)

Tabla 12. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso pirometalúrgico.

Elemento	% Rec. Promedio	Valor USD/kg
Cobalto	80%	\$30–40
Níquel	85%	\$18–22
Cobre	90%	\$8–10

Nota: Adaptado de “*Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries*”, (Lima, 2022), Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2203>

Estos porcentajes y valores potenciales relacionado a la recuperación de materiales serán de utilidad para determinar las ganancias potenciales de reciclar las baterías mediante la realización de este proceso pirometalúrgico.

2.4.3 Proceso hidrometalúrgico.

Este es un proceso del tipo químico donde principalmente se recuperan metales valiosos como litio, cobalto, níquel y manganeso. Este proceso tiene las siguientes etapas (Gaines, Science direct, 2014):

1. Pretratamiento: sus características fueron explicadas en el apartado anterior, y las importancias de esta etapa es la obtención de la masa negra para su procesamiento en la siguiente etapa.

2. Lixiviación: esta masa negra se mezcla con ácidos (como ácido sulfúrico, H_2SO_4) y, a veces, con un agente reductor (como peróxido de hidrógeno, H_2O_2) para disolver los metales en solución. El resultado es una solución líquida rica en metales y un residuo sólido (posiblemente grafito u otros materiales no lixiviados).

3. Purificación: se hace la precipitación de la solución previamente obtenida para obtener soluciones purificadas de metales individuales como: sulfato de cobalto (CoSO_4), sulfato de níquel (NiSO_4), sulfato de manganeso (MnSO_4) y sulfato de litio (Li_2SO_4)

4. Recuperación de metales: de las soluciones purificadas obtenidas en la etapa anterior.

Este proceso tiene altas ganancias, pero requiere de un exhaustivo proceso de tratamiento de agua residuales, ya que utiliza altas cantidades de agua, que no pueden ser solo desechas y su proceso de lixiviación tiene una alta demanda energética. (American Chemical Society Research team, 2022)

- **Costo operativo del proceso.**

Los valores promedio reportados en la literatura consultada, sugieren un costo promedio de \$1,500 – \$3,500 USD por tonelada de baterías procesadas. (Gaines, Science direct, 2014)

Tomando en cuenta los siguientes elementos del costo operativo: (Gaines, Science direct, 2014)

- Los reactivos químicos
- El consumo energético
- El tratamiento de residuos
- La mano de obra y el mantenimiento
- El costo de agua.

- **Ganancia potencial por recuperación de materiales.**

Las ganancias potenciales de este tipo de proceso están sujetas distintas variables, sin embargo, la bibliografía existente sugiere la siguiente ganancia promedio (Yang, 2021). Como se muestra en la siguiente **tabla 13**.

Tabla 13. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso hidrometalúrgico.

Metal	Contenido aprox. por tonelada	Precio aprox. (USD/kg)
Litio (Li_2CO_3)	85-95%	\$20–30/kg
Cobalto (Co)	90-98%	\$30–40/kg
Níquel (Ni)	90-98%	\$16–20/kg
Manganeso (Mn)	85-95%	\$2–3/kg
Cobre (Cu)	95-99%	\$8–10/kg

Nota: Adaptado de “Reciclaje de baterías de litio para vehículos eléctricos” (Yang, 2021)

La información presentada a lo largo de este capítulo fue tomada como fundamento para realizar la propuesta metodológica, utilizando los puntos relacionados a los procesos de reciclaje antes presentados, en las distintas etapas de la metodología que se ha desarrollado para el análisis de viabilidad del reciclaje de baterías de Ion de litio. Esto se explica con mayor detalle en el siguiente capítulo 3.

3.Soluciones conceptuales e ingeniería previa

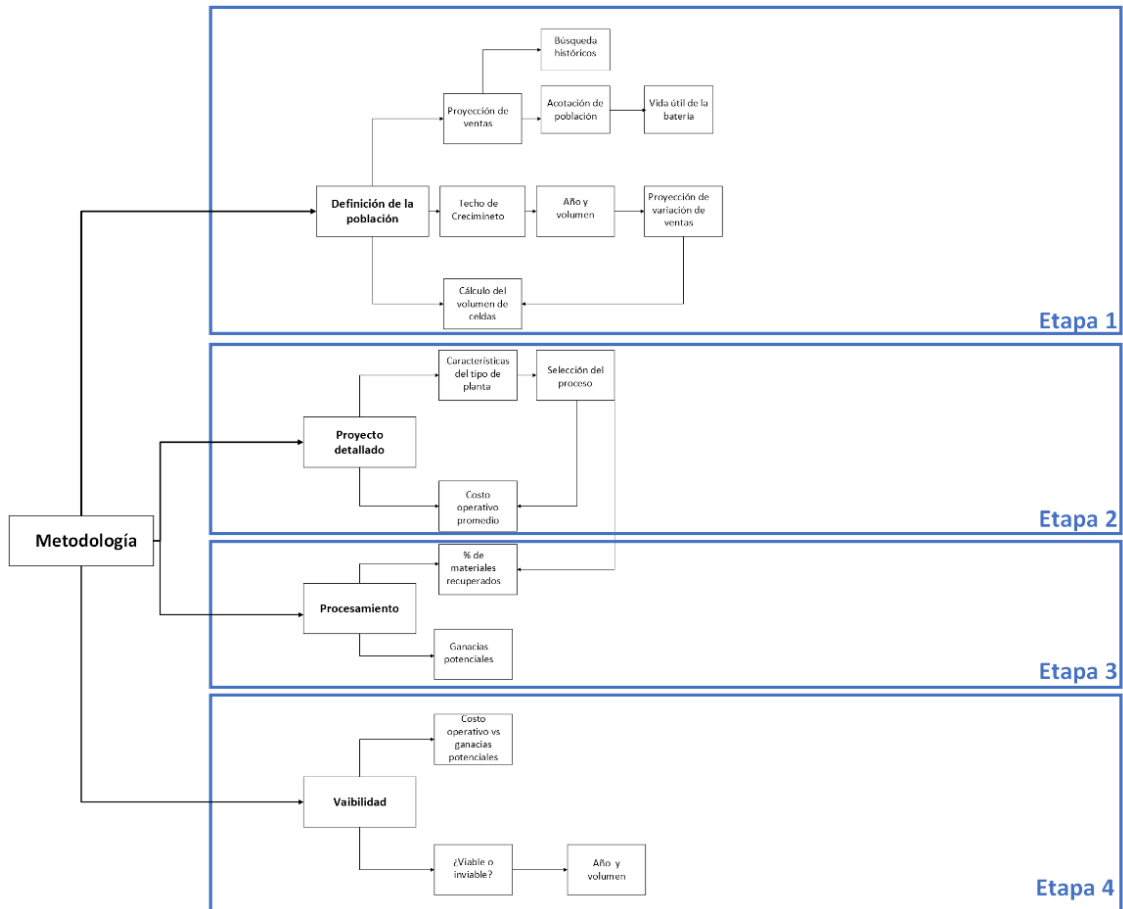
Al realizar la revisión bibliográfica, relacionada al reciclaje de baterías automotrices Ion litio en México, se observa la oportunidad para llenar un faltante de información sobre las implicaciones económicas, desde una perspectiva nacional teniendo en cuenta que la viabilidad económica es hoy en día un freno para el reciclaje de las baterías automotrices de ion litio, no solo en México, sino en el mundo.

Por lo anterior y sumado a la necesidad global de proponer soluciones que faciliten el reciclaje para reducir las consecuencias socio ambientales que la inapropiada gestión de la disposición final de estas baterías y la necesidad acelerada de responder a la demanda de fabricación de baterías, dan como resultado el interés por desarrollar una propuesta metodológica, que permita analizar la situación del reciclaje en México con relación al volumen de unidades en etapa de descarte actuales y proyectadas.

La metodología propuesta busca ser transversal a cualquier país o tecnología automotriz de locomoción, proponiendo un análisis preliminar resultando en herramientas que faciliten la toma de decisión relacionado a la toma de decisión de implementar una planta de reciclaje de baterías.

A continuación, se muestra, a manera de diagrama en la **figura 12**, la metodología desarrollada a lo largo de esta maestría, explicando de forma detallada cada etapa posteriormente.

Figura 12. Diagrama esquemático de la metodología propuesta.



Nota: Elaboración propia

La definida como etapa 1 inicia con un análisis poblacional a partir del cual se pueda parametrizar las características sistemáticamente, mostrado a continuación:

3.1 Etapa 1: definición la población.

Para definir el volumen de la población que se desea analizar con la metodología propuesta, se requiere estructurar las siguientes etapas:

3.1.1. Proyección de ventas.

- **Búsqueda de históricos**

Como fue visto en el capítulo 2, es necesario recurrir a las bases de datos existentes que provean información primaria de calidad y que permita acceder a los históricos de ventas para parque automotor en general y al tipo de vehículo de interés para la investigación en particular.

Se sugiere acudir a las páginas oficiales públicas de estadística de los países o a bases confiables como Euromonitor entre otras. Una vez allí es necesario filtrar la información de acuerdo con las siguientes variables:

1. Región
2. Motorización
3. Ventana de tiempo

A continuación, en la **figura 13**, se muestra un ejemplo de una página de estadística oficial mexicana llamada INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía)

Figura 13. Diagrama esquemático de la metodología propuesta.

The screenshot displays the INEGI website interface for the 'Venta de vehículos híbridos y eléctricos por entidad federativa' page. The page features a navigation bar with links to 'Temas', 'Programas de información', 'Sistemas de Consulta', 'Infraestructura', and 'Acerca del INEGI'. Below the navigation bar, there is a search bar and a 'Buscar' button. The main content area is titled 'Venta de vehículos híbridos y eléctricos por entidad federativa' and includes a 'Seleccionar variables' section. This section contains four filters: 'Año' (Year) with a list of years from 2016 to 2023; 'Mes' (Month) with a list of months from Enero to Agosto; 'Entidad Federativa' (Federal Entity) with a list of states from Aguascalientes to Chihuahua; and 'Unidades vehiculares' (Vehicles) with a list of vehicle types: 'Unidades Vehiculares Eléctricas', 'Unidades Vehiculares Híbridos Plugin', and 'Unidades Vehiculares Híbridos'. Each filter has a search bar and a 'Buscar' button.

Nota: Tomado de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024)

El resultado de realizar este primer filtro permite tener el volumen de autos vendidos en la venta de tiempo determinada, como una primera muestra de la población.

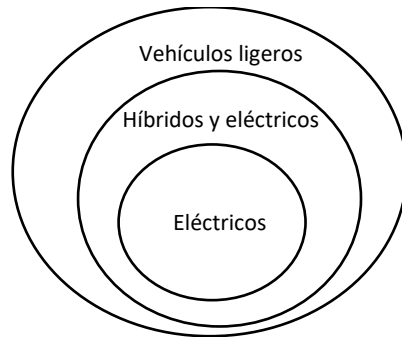
- **Acotación de la población.**

De los históricos obtenidos, es necesario restringir la información al tipo de vehículo pertinente para la investigación a realizar, de acuerdo con lo propuesto en el capítulo 2, las variables a tomar en cuenta son:

1. Autos únicamente eléctricos.
2. Autos híbridos conectables.
3. Autos híbridos no conectables.

El resultado conseguido, muestra una población acotada a la tecnología de interés más conveniente para el proyecto, como se muestra en la **figura 14**.

Figura 14. Acotación de la población



Nota: Elaboración propia.

La metodología, como se mencionaba anteriormente, está enfocada en vehículos con alimentación eléctrica que funcionan únicamente con motor eléctrico, justificada en su tiempo de vida útil.

- **Vida útil de la batería.**

El criterio que soporta la selección del motor eléctrico se fundamenta en la accesibilidad a los tiempos de vida útiles de las baterías de Ion Litio, comparado con las baterías en autos híbridos o híbridos conectables, ya que estos tienen una combinación de uso entre el motor de combustión y las baterías, lo cual dificulta la determinación de la vida útil de las baterías presentes en este tipo de vehículos.

De esta etapa la acotación población del tipo de automóvil sobre el cual se realizará la proyección de ventas.

3.1.2 Definición del techo de crecimiento del parque vehicular de autos eléctricos.

- **Proyección de variación de ventas con base en los históricos:**

Como se mencionaba en el capítulo 1, debido a la limitada disponibilidad de los recursos naturales utilizados para la fabricación de las baterías Ion Litio, de debe topar un crecimiento en

las ventas proyectadas del tipo de vehículo previamente elegido, a esto se le llamará techo de crecimiento del parque vehicular, sugiriendo recurrir a una fuente secundaria relevante.

Las variables por definir son:

1. Tipo de vehículo
2. Año y cantidad de unidades del tipo de vehículo:

El resultado preliminar obtenido corresponde al volumen de autos puramente eléctricos, existentes en el mercado, en la venta de tiempo delimitada, y llamaremos a este resultado **“existencias”**

Ya que se ha definido el techo de crecimiento y las ventas históricas del país que es se desea analizar, es necesario que se calcule la variación de ventas entre los históricos, de la venta de tiempo previamente elegida.

De las variaciones obtenidas, habrá que definir un valor optimista y uno pesimista, primeramente, y usar ambos valores para proyectar las ventas año definido previamente como techo de crecimiento y comparar el volumen obtenido proyectado contra el techo de crecimiento definido.

Una vez que se ha realizado la actividad uno a cuatro, se tiene definida la subetapa 3: Una proyección ventas de autos puramente eléctricos, acotada a una ventana de tiempo, con base en los históricos, la variación de ventas de estos y un techo de crecimiento del parque vehicular, esperado para el país.

3.1.3 Cálculo de celdas de Ion Litio para la venta de tiempo.

Una vez que ya se ha definido el volumen de autos, hay que convertir este volumen a celdas, utilizando la equivalencia que propone esta metodología: Un auto eléctrico, en promedio tiene entre 192 y 7,000 celdas como se mencionó en el capítulo 2.3. Se usa un promedio debido a que la cantidad de celdas varía según el tamaño de cada modelo de auto, por lo que se propone hace el cálculo mediante la **ecuación 1**:

Ecuación 1. Cálculo de número de celdas.

$$\text{Número de celdas} = 3,692 \text{ celdas promedio por vehículo (Existencias)}$$

Nota: El número de celdas puede ser distinto según sea el interés de la aplicación de la metodología siempre y cuando sea justificado con información confiable y comprobable.

Al concluir la etapa 1 de la presente metodología el resultado obtenido debe ser: el número de celdas disponibles en la ventana de tiempo acotada. Es necesario que el número de celdas disponibles antes mencionado sea proyecto a su año de descarte en esta etapa, es decir que si en el año 2016 hay “x” número de celdas, entonces están se encuentren en el año 2026 como celdas en etapa de descarte, tomando en cuenta que la vida útil de una batería de máximo 10 años, como se mencionó en el capítulo 1.3.

Esto dará como resultado final de la etapa 1, la cantidad de celdas en etapa de descarte, para la ventana de tiempo acotada.

Esta información es relevante para investigaciones relacionadas con:

- Análisis de ciclo de vida.
- Reciclaje de baterías.
- Proyecciones para el consumo de materiales vírgenes.

3.2. Etapa 2. Proyecto detallado.

Para determinar y justificar el tipo de proceso seleccionado para procesar el número de celdas disponibles en la ventana de tiempo, es necesario determinar las características de las plantas necesarias para realizar los procesos de reciclaje (separación mecánica, pirometalúrgico e hidrometalúrgico), sus costos operativos y de implementación para estas plantas. Para eso es necesario realizar las siguientes etapas

3.2.1 Características de la planta

Se realiza una investigación bibliográfica, buscando documentar principalmente las siguientes variables:

- Características generales del proceso y sus etapas.
- Costos operativos y de implementación promedio.

Es recomendable hacer la investigación y documentación de los procesos, desde fuente confiable como pueden serlo paginas oficiales de los países que tenga información relacionada o trabajos de investigación que cuenten con referencias verificables y con información válida.

Usualmente los trabajos de investigación relacionados con análisis de costos de este tipo de procesos cuentan con información que puede ser de utilidad para esta etapa. En fuentes como lo es Science Direct, donde se pueden encontrar distinto trabajos de investigación.

También es recomendable consultar foros como lo es el foro energético por la Agencia Internacional de la Energía, ya que muestra estudios y publicaciones que pueden nutrir la indagación en la bibliografía existente, así como proporcionar datos relevantes.

Estas solo son algunas recomendaciones que pueden seguirse para detonar el proceso de investigación y de selección del tipo de planta, tomando en cuenta que esta selección puede variar según las necesidades donde se busca aplicar la metodología, pero se recomienda tomar en cuenta los siguientes puntos:

- La capacidad de la planta requerida.
- El nivel de automatización deseado.
- Tipo de materiales recuperados.
- Demanda energética.

En el caso de este proyecto, se elige el proceso de separación mecánica, la justificación es presentada en capítulo 5.

3.2.2 Costos totales

Como se menciona en el capítulo 2, referente al costo de implementación y operación de la planta, este depende del tamaño de la planta. Y el tamaño de esta dependerá del volumen demandado para su procesamiento, como se muestra nuevamente en la **tabla 8**.

Tabla 8. *Costo promedio operativo para el proceso de separación mecánica.*

Tamaño de planta	Capacidad mensual	Costo operativo mensual estimado	Costo estimado mensual de implementación
Pequeña	10 – 50 toneladas	\$50,000 – \$150,000 USD	\$0.8 millones- 4.0 millones USD

Mediana	50 – 500 toneladas	\$150,000 – \$500,000 USD	\$3-20 millones USD
Grande	500 – 2,000 toneladas	\$500,000 – \$2,000,000 USD	\$15-60 millones

Nota: Adaptado de “*Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries*”, (Lima, 2022), Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2203>

Estos costos serán utilizados para realizar el cálculo de costos totales en la aplicación de la metodología en el capítulo 5.

3.3 Procesamiento.

Una vez que se ha determinado y justificado la elección del tipo de planta y sus costos toatales (sumatoria de costos operativos y de implementación), es necesario determina qué será obtenido de este proceso, para ellos es necesario seguir los siguientes pasos:

3.3.1 Determinar el porcentaje de materiales recuperados:

Recapitulando sobre menciones anteriores, hay distintos tipos de baterías y para poder hacer la determinación de este porcentaje, es necesario primero elegir el tipo de estas.

La elección debe estar fundamentada en la bibliografía existente y puede ser basada en criterios como:

- Tipo de batería más común en los autos eléctricos.
- Tipo de vehículo más vendido en el espacio geográfico analizado.

3.3.2 Ganancias potenciales.

En la bibliografía actual ya se encuentra el precio de los materiales obtenidos por los distintos tipos de reciclaje. En esta etapa se debe calcular las ganancias contra los costos totales antes mencionado.

Se propone la siguiente fórmula para el cálculo de las ganancias potenciales:

Ecuación 2. Ganancias potenciales

$$\text{Ganancias potenciales} = [(\text{Ganancias obtenidas}) - (\text{costos operativos} + \text{costos de implementación})]$$

3.4 Viabilidad.

Una vez que ya se han calculado los costos operativos y las ganancias potenciales, relacionados el número de celdas disponibles dentro de la venta de tiempo acotada, se hace una comparativa entre estos.

El costo operativo no debe ser igual o menor a las ganancias potenciales para poder afirmar que hay una posibilidad preliminar de que sea viable el reciclaje de las celdas disponibles, mediante el proceso elegido en el país que se desea analizar.

El resultado de este análisis debe ser:

- Viable o inviable.
- Año.

4. Estrategia de desarrollo de ingeniería de detalle

El capítulo 4 presenta la estrategia metodológica que guía el desarrollo de la investigación, así como las herramientas, etapas y consideraciones necesarias para aplicar la metodología propuesta al análisis de viabilidad económica del reciclaje de baterías de ion litio en México. En esta sección se describen los fundamentos que sustentan la selección del enfoque mixto, los criterios utilizados para la recopilación y validación de información, las etapas de intervención que estructuran el trabajo y los riesgos que pueden influir en su ejecución. Todo ello permite establecer un marco de aplicación claro, ordenado y verificable, indispensable para garantizar la coherencia técnica y la pertinencia del estudio en el contexto nacional.

4.1. Justificación de la estrategia metodológica o de intervención/investigación

Como se ha mencionado con anterioridad, el presente trabajo pretende realizar un análisis de viabilidad mediante la aplicación de la metodología desarrollada y propuesta a lo largo del presente trabajo de obtención grado. Para la aplicación de esta se consideran enfoques cualitativos y cuantitativos como se explica en la **tabla 14**.

Tabla 14. Enfoques del proyecto.

Descripción.	Enfoque.	Variables.
Definición de la población para en análisis de viabilidad mediante la metodología.	Cualitativo.	- Tipo de auto. - Tipo de batería.
Definición del proceso para procesar el volumen de celdas en la venta de tiempo determinada.	Cualitativo.	- Características conceptuales del proceso y maquinaria.
Costos operativos y ganancias potenciales del procesamiento del volumen de celdas (mediante el proceso seleccionado)	Cuantitativo	- Costos promedio operativos. - Volumen de celdas proyectadas con base en los históricos

Nota: elaboración propia.

Aunque los procesos ya existentes de reciclaje implican altos costos económicos y energéticos, la metodología para el análisis de la viabilidad puede ser aplicada a lo largo que los procesos de van volviéndose más rentables y sustentables. Esto debido a que la base de su aplicación esta mayormente relacionada al volumen de baterías dentro de una venta de tiempo para el país que desea aplicarse, es por esto por lo que se elige un enfoque mixto, que permita la adaptación de la metodología de la mano con los avances y mejoras de los procesos.

4.1.1. Consideraciones costo/beneficio de la estrategia

Las consideraciones costo/ beneficio de muestra en el apartado 5, donde se hace la comparativa de las ganancias potenciales contra los costó operativos de planta para el proceso elegido, que para motivos de este proyecto será el proceso de separación mecánica.

Se utilizarán de sustento los costos mencionados en el capítulo 2, así como los potenciales valores, en las tablas **tabla 8 y 9**.

4.2. Herramientas e instrumentos

Para el desarrollo del proyecto se consultan herramientas de recopilación indirecta para poder obtener información de fuentes secundarias, que permita la sustentación y desarrollo de la solución propuesta a lo largo del presente trabajo, como se muestra en la **tabla 15**.

Tabla 15. Herramientas de investigación

Herramienta.	Justificación.	Etapas del proyecto.	¿Qué información se busca obtener para cada etapa?
Nombre de la herramienta: Google Escolar Información: Trabajos de investigación existentes, información de tipo secundaria.	Para el desarrollo del presente documento y sustentación del proyecto, se requiere de información fiable, provenientes de trabajos de investigación existentes.	a) Indagación inicial. b) Caracterización del problema: contexto en México y el mundo, delimitación del proyecto c) Estado de la cuestión: Conceptos teóricos relacionados	a) Tener una dimensión del estado actual de la problemática, acotación de esta y hallazgos de posibles áreas de participación. b) Sustentación de la pertinencia del realiza el presente trabajo. c) Definición de conceptos clave para el desarrollo de la metodología y que permita el análisis económico.
Nombre de la herramienta: INEGI. Información: Datos estadísticos de México.	Para determinar la dimensión del problema es necesario recurrir a fuentes confiables de estadística, muestren los históricos de las ventas de autos eléctricos en México.	a) Indagación inicial. b) Caracterización del problema: contexto en México y delimitación del proyecto.	a) Permite tener una dimensión del problema desde un enfoque cuantitativo y usar esto para una variable a considerar para la pertinencia del desarrollo. b) Se obtienen datos cualitativos y cuantitativos que puedan usarse para sustentar la importancia y el impacto del proyecto, así como una fuente de información que alimente más a adelante la aplicación de la metodología en el contexto mundial.
Agencia Internacional de energía. Información: base de datos, estudios y reportes.	Permite acceder a estudios ya realizados por esta agencia internacional y tener un contexto mundial, ya que el contexto nacional está aún en desarrollo	a) Caracterización del problema: contexto mundial, delimitación del proyecto.	a) Permite ver tendencias mundiales en el reciclaje de las baterías de litio, así como la acotación con base en estas.

Nota: Elaboración propia.

4.3. Muestra o sujetos de investigación

La metodología será principalmente aplicada al espacio geográfico de México como primer sujeto de muestra, para tener obtener información que hasta el momento no existe, logrando hacer una aportación que sea de utilidad.

Esta información es relevante para investigaciones relacionadas con:

- Análisis de ciclo de vida.
- Reciclaje de baterías.
- Proyecciones para el consumo de materiales vírgenes.
- Análisis de viabilidad para el contexto nacional.

4.4. Etapas del proceso de aplicación de la intervención/investigación

Las etapas para el desarrollo del proyecto serán:

1. Definición del problema – Condiciones iniciales para el desarrollo de la solución.
2. Delimitación de región de estudio – Alcances del proyecto y definición de la población
3. Identificación de variables y requerimientos - Descripción cualitativa y cuantitativa, de procesos de reciclaje, tipos de vehículos, tipos de baterías, etc.
4. Exploración de soluciones y diseño de propuesta metodológica – definición de etapas y actividades de la metodología
5. Prueba de Concepto – Aplicación de la metodología a México
6. Análisis e integración de resultados – procesar de la información obtenida de la prueba de concepto.
7. Verificación y Validación – comparar los resultados obtenido con los objetivos del proyecto y hacer conclusiones.

4.4.1. Cronograma de trabajo

Tabla 16. Cronograma del proyecto.

Etapas	2023	2024			2025		
	Otoño	Primavera	Verano	Otoño	Primavera	Verano	Otoño
Definición del problema							
Delimitación de región de estudio							
Identificación de variables y requerimientos							
Exploración de soluciones y diseño de propuesta metodológica							
Prueba de Concepto							
Análisis e integración de resultados							
Verificación y Validación							

Nota: Elaboración propia

4.4.2. Plan de manejo de riesgos

Al realizar las etapas de desarrollo del proyecto mencionadas en el capítulo 4.4 se pueden encontrar situaciones que pongan en riesgo el desarrollo y pertinencia del proyecto que presenta en este documento.

A continuación, **en la tabla 17**, se presenta el análisis del nivel de impacto y la probabilidad que tienen las posibles situaciones riesgo

Tabla 17. Situaciones de riesgo y estrategias de mitigación.

Número	Riesgo / Situación	Impacto	Probabilidad	Estrategia de Mitigación	Etapas de aplicación de la Estrategia
1	Disponibilidad limitada de datos confiables	Significativo	Alta	Buscar fuentes oficiales (INEGI, SEMARNAT, AMIA)	4.2 Herramientas e instrumentos
2	Acceso restringido a información sensible de la industria en contexto mexicano	Significativo	Media	Usar fuentes de industrias internacionales y trabajos de investigación en el contexto latinoamericano	4.2 Herramientas e instrumentos

3	Errores en la proyección de la demanda de baterías desechadas	Mayor	Media	Utilizar diferentes modelos de proyección (optimista, conservador, pesimista) para obtener escenarios comparativos.	3.1.2 Definición del techo de crecimiento del parque vehicular de autos eléctricos.
4	Falta de bibliografía especializada en el contexto mexicano	Significativo	Media	Complementar con literatura internacional y adaptar al marco nacional al aplicar la metodología	2. Marco conceptual
5	Cambios en la literatura: presencia de trabajos con los mismos hallazgos	Severo	Baja	Mantener actualizado la revisión literaria	Durante el desarrollo del Capítulo 1 al 4
6	Limitaciones técnicas en el proceso de separación mecánica	Significativo	Media	Contrastar con estudios sobre pirometalurgia e hidrometalurgia; aclarar en la tesis el alcance de la metodología.	2.4 Procesos de Reciclaje y sus Características.
7	Dependencia de proyecciones macroeconómicas inciertas (inflación, tipo de cambio)	Mayor	Media	Consultar periódicamente costos para hacer los cambios/incorporarlos en el TOG.	2.4 Procesos de Reciclaje y sus Características.

Nota: Elaboración propia.

La matriz de riesgos evidencia que el proyecto enfrenta desafíos significativos vinculados a la disponibilidad de información confiable, las limitaciones técnicas de los procesos de reciclaje y la influencia de factores externos como la economía y la evolución académica. No obstante, la identificación temprana de estos riesgos y el planteamiento de estrategias de mitigación específicas en cada etapa del trabajo fortalecen la viabilidad de la investigación. En conjunto, este análisis refuerza la relevancia de la tesis en un contexto nacional donde aún existe una limitada

experiencia en el reciclaje de baterías de ion de litio, aportando un marco metodológico sólido y adaptable a la realidad mexicana.

4.5. Metas de información

La presente investigación requiere una base de información confiable que permita responder a los objetivos específicos planteados. Para ello, se busca hacer una recopilación que combina fuentes nacionales e internacionales, con un enfoque tanto cuantitativo como cualitativo.

Esta integración de distintas fuentes fortalece la validez de los resultados y aporta un marco comparativo entre el contexto nacional y global. Asimismo, permite caracterizar el volumen de baterías en etapa de descarte, proyectar los costos asociados a la implementación de una planta de reciclaje y analizar la viabilidad económica de recuperar metales valiosos. En este sentido, la selección de herramientas y fuentes responde directamente a cada uno de los objetivos de la investigación, antes mencionados.

A continuación, en la **tabla 18**, se presentan la información que se busca obtener de las distintas herramientas de recopilación y su relación con los objetivos del presente proyecto.

Tabla 18. Clasificación de las herramientas de investigación y su relación con los objetivos del proyecto

Información	Herramienta de recopilación	Tipo de información	Fuente	Objetivo
Trabajos de investigación existentes, información de tipo secundaria.	Google Escolar	Cualitativa y cuantitativa	Secundaria	Objetivo específico 2: Determinar la proyección de costo de una planta de reciclaje de baterías ion litio, considerando costos de implementación, operación y preparación de materiales. Objetivo específico 2: Analizar la viabilidad de la implementación de una planta de reciclaje de baterías de ion litio ubicada en México de acuerdo con los beneficios económicos derivados de la recuperación de metales valiosos.

Datos estadísticos de México. históricos de las ventas de autos eléctricos en México.	Portal oficial del INEGI	Cuantitativa	Secundaria.	Objetivo específico 1: Caracterizar la cantidad de baterías de ion de litio en etapa de descarte en México, para el periodo 2025-2035, mediante la proyección de ventas de vehículos eléctricos y su ciclo de vida útil.
Información: base de datos, estudios y reportes. contexto mundial, ya que el contexto nacional está aún en desarrollo	Base de datos de La Agencia Internacional de energía.	Cuantitativa y cualitativa	Secundaria	Objetivo específico 3: Analizar la viabilidad de la implementación de una planta de reciclaje de baterías de ion litio ubicada en México de acuerdo con los beneficios económicos derivados de la recuperación de metales valiosos.

Nota: Elaboración propia.

5. Exposición y análisis de resultados y hallazgos

A lo largo de esta capítulo se realiza la aplicación de la metodología diseñada y propuesta en el **capítulo 3**, aplicada al objeto de estudio de interés de la República Mexicana. Con la intención de obtener resultados de una primera iteración de la metodología.

5.1 Etapa 1: definición la población.

Como lo menciona el capítulo 3.1, habrá que definir la población que se desea analizar con la metodología propuesta, específicamente en este caso de estudio, para el país México, estructurando las siguientes etapas:

5.1.1. Proyección de ventas.

- **Búsqueda de históricos**

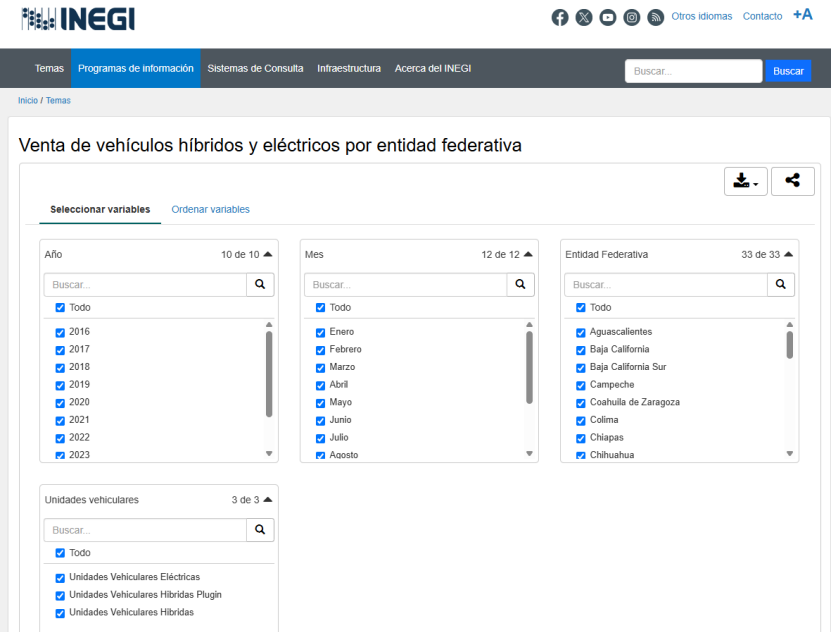
Como se indica en el apartado 3.1.1, es indispensable recurrir a fuentes públicas oficiales de estadística que ofrezcan información primaria confiable y de calidad. Con este propósito, se realizó una búsqueda en el portal oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), aplicando los filtros establecidos por la metodología, los cuales fueron:

- 1) Región: República Mexicana
- 2) Motorización: vehículos con sistema eléctrico

3) Ventana de tiempo: 2016-2024

La **figura 15**, se muestran los filtros empleados dentro de la plataforma de estadística INEGI:

Figura 15. Filtros aplicados para obtener las variables propuestas por la metodología.



Nota: Tomado de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024)

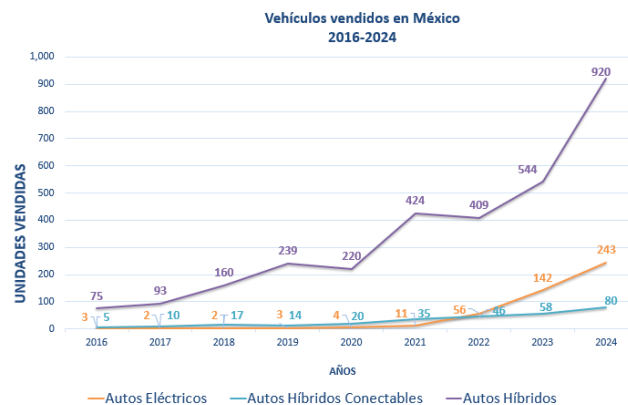
La aplicación de estos filtros permitió obtener el volumen de vehículos con sistema eléctrico vendidos en México (híbridos, híbridos enchufables y eléctricos) durante el periodo 2016-2024. Esta información conforma la primera muestra de la población objetivos del estudio y se presenta en la siguiente **tabla 19**.

Tabla 19. Ventas de autos con sistema eléctrico (Eléctricos, Híbridos e Híbridos conectables) del 2016 a 2024

Año	Unidades Eléctricas	Unidades Híbridas Conectables	Unidades Híbridas	Unidades totales con sistema eléctrico
2016	254	521	7,490	10,281
2017	237	968	9,349	12,571
2018	205	1,676	16,022	19,921
2019	305	1,365	23,938	27,627
2020	449	1,986	21,970	26,425
2021	1,140	3,492	42,447	49,100
2022	5,631	4,575	40,859	53,087
2023	14,172	5,778	54,368	76,341
2024	24,290	7,994	92,026	126,334
Total	46,683	28,355	308,469	383,507

El análisis de ventas de las tres categorías de automóviles muestra un crecimiento sostenido a lo largo del periodo evaluado. Para facilitar esta apreciación de esta tendencia, **la figura 16** presenta la evolución gráfica del comportamiento anual

Figura 16. Crecimiento de ventas del año 2016 a 2024 de vehículos con sistema eléctrico.



Nota: Tomado de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024)

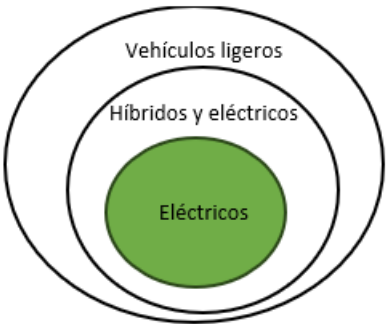
Hasta este punto el resultado obtenido es: una **muestra de una población inicial total de 383,507 vehículos con sistema eléctrico vendidos en México del 2016-2024**

- **Acotación de la población.**

Una vez obtenida **la primera muestra poblacional** de los vehículos con sistema eléctrico vendidos en México entre el 2016 y 2024, es necesario acotar esta información al tipo de vehículo relevante para el presente estudio. Para los fines de este proyecto, **únicamente se considera los vehículos totalmente eléctricos**, selección que se justifica en el apartado posterior relacionado a la vida útil de la batería.

A continuación, en la **figura 17**, se muestra esta delimitación dentro del conjunto total de tipos de vehículos analizados.

Figura 17. Acotación de vehículos únicamente eléctricos



Nota: Elaboración propia.

Como resultado de esta acotación, se obtiene la **población específica del interés** de esta aplicación de la metodología: un total de **46,683 unidades de vehículos totalmente eléctricos vendidos en el periodo 2016-2024**, como se presenta en la **tabla 20**.

Tabla 20. Unidades eléctricas totales vendidas del año 2016 al 2024

Año	Unidades Eléctricas
2016	254
2017	237
2018	205
2019	305
2020	449
2021	1,140
2022	5,631
2023	14,172
2024	24,290
Total	46,683

Nota: Históricos del año 2016-2024 tomados de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024). Aquí se presenta el detalle de unidades vendidas año con año, así como el total, esta información será de utilidad en los pasos siguientes.

A partir de este total y de las cantidades año con año, será posible proyectar cuándo estos vehículos alcanzarán su final de vida útil, información que es clave para dimensionar la posible demanda procesar en el apartado de proyecto detallado.

- **Vida útil de la batería.**

Como se mencionó en el apartado 1.3, la vida útil máxima de una batería de ion-litio de un vehículo eléctrico es de aproximadamente 10 años, es posible proyectar el momento en el que las unidades previamente identificadas entrarán en su etapa de descarte. Con base en las ventas históricas presentadas en la **tabla 20**, la **tabla 21** muestra la estimación de vehículos cuyas baterías alcanzarán su **fin de vida útil entre 2026 y 2034**, siguiendo la proyección de 10 años a partir de su venta.

Tabla 21. Unidades eléctricas totales con baterías en etapa de descarte del año 2026 al 2034

Año	Ventas históricas de Unidades eléctricas	Unidades eléctricas con baterías en descarte
2016	254	
2017	237	
2018	205	
2019	305	
2020	449	
2021	1,140	
2022	5,631	
2023	14,172	
2024	24,290	
2025		
2026		254
2027		237
2028		205
2029		305
2030		449
2031		1,140
2032		5,631
2033		14,172
2034		24,290
Total		46,683

Nota: Históricos tomados de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024)

La selección de vehículos totalmente eléctricos como población objetivo se sustenta en la disponibilidad de la información sobre la vida útil de sus baterías de ion litio. En contraste, los vehículos híbrido conectables y no conectables combinan el uso del motor de combustión interna y la batería, lo que genera variaciones en los ciclos de carga y descarga, dificultando estimar con precisión su vida útil, como se mencionó en el apartado 3.1.1

5.1.2 Definición del techo de crecimiento del parque vehicular de autos eléctricos.

- **Proyección de variación de ventas con base en los históricos:**

En el capítulo 3.1.2 se explicó que, para proyectar el crecimiento del parque vehicular eléctricos, es necesario establecer un límite máximo (techo de crecimiento) que permita acotar el incremento esperado de las ventas de este tipo de vehículos. La aplicación de la metodología requiere definir dos variables principales, las cuales son:

1. **Tipo de vehículo:** vehículos eléctricos, es decir que son aquellos que funcionan únicamente con motor eléctrico y batería. Esta acotación fue establecida al final del apartado 5.1.1
2. **Año y cantidad de unidades del tipo de vehículo:** tomando como base los históricos del INEGI para el periodo 2016-2024

Para poder dar contexto al comportamiento futuro de las ventas, se consideran las proyecciones del *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes generales de la Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista*, elaborado por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Este programa estima **2 posibles escenarios** de unidades venidas **al 2035:** (Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), 2021):

1. Escenario optimista: 5.7 millones de vehículos eléctricos.
2. Escenario pesimista: 2.7 millones de vehículos eléctricos.

Para realizar la proyección de crecimiento propuesta en la metodología, es necesario contar con un escenario optimista y otro pesimista año con año. Para ello, se toma como referencia la variación entre cada año, observada en los históricos (2016-2024), como se presenta en la **tabla 22.**

Tabla 22. Variación anual de ventas históricas del año 2016 al 2024.

Año	Unidades Eléctrica Vendidas Históricas	Porcentaje de variación de ventas de lo Históricos
2016	254	
2017	237	-7%
2018	205	-14%
2019	305	49%
2020	449	47%
2021	1,140	154%
2022	5,631	394%
2023	14,172	152%
2024	24,290	71%
Total	46,683	

Nota: Históricos tomados de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024), cálculo de variación de ventas con respecto al año anterior como elaboración propia. El porcentaje de variación de ventas pesimista de resalta en color naranja y el optimista en color verde.

A partir de esta tabla se seleccionan los valores positivos de variación que serán utilizados como referencia para los escenarios de crecimiento:

- Pesimista :47%
- Optimista: 154%

Estos valores permiten proyectar las ventas anuales desde el 2025 al 2035, año en el que se determinara el techo de crecimiento. **Las tablas 23 y 24**, muestran las proyecciones pesimista y optimista, de la siguiente manera

Tabla 23. Proyección de ventas con el valor de variación de ventas históricas **pesimista** del 2025 al 2035.

Año	Proyección de Ventas Escenario Pesimista	Porcentaje de Variación de Ventas Proyectadas Escenario Pesimista
2025	35,706	
2026	52,488	47%
2027	77,158	47%
2028	113,422	47%

2029	166,730	47%
2030	245,093	47%
2031	360,287	47%
2032	529,622	47%
2033	778,545	47%
2034	1,144,461	47%
2035	1,682,357	47%
Total	5,185,870	

Nota: Cálculo realizado con la variación de ventas de los históricos tomados de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024), tomando el porcentaje de variación pesimista del 47% entre cada año.

*Tabla 24. Tabla 25. Proyección de ventas con el valor de variación de ventas históricas **optimista** del 2025 al 2035.*

Año	Proyección de Ventas Optimista	Porcentaje de Variación de Ventas Proyectadas Optimista
2025	61,697	
2026	156,709	154%
2027	398,042	154%
2028	1,011,026	154%
2029	2,568,006	154%
2030	6,522,736	154%
2031	16,567,750	154%

2032	42,082,085	154%
2033	106,888,496	154%
2034	271,496,779	154%
2035	689,601,818	154%
Total	1,137,355,143	

Nota: Cálculo realizado con la variación de ventas de los históricos tomados de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024), tomando el porcentaje de variación optimista del 154% entre cada año.

Al comparar el número de unidades proyectadas para el año 2035 con los escenarios planteados por la CENACE, se observa lo siguiente:

- La proyección optimista supera ambos escenarios propuestos por la CENACE.
- La proyección pesimista muestra un total al 2035 **de 1,682,357 unidades**, cifra que se acerca más al escenario pesimista de CENACE, de **2.7 millones al 2035**.

Por este motivo, y como lo establece el **apartado 3.2.1**, se selecciona la proyección de ventas pesimista con una tasa de crecimiento anual del 47% en la ventana del año 2025-2035, como la proyección de ventas.

La **figura 18** muestra la integración de los históricos del 2016-2024 y las proyecciones del 2025-2035 bajo el escenario pesimista adoptado como referencia.

Figura 18. Existencias del año 2016 al 2035, históricas y proyectadas.

Año	"Existencias"	
2016	254	Históricos INEGI
2017	237	
2018	205	
2019	305	
2020	449	
2021	1,140	
2022	5,631	
2023	14,172	
2024	24,290	
2025	35,706.30	Unidades Vendidas Proyectadas
2026	52,488.26	
2027	77,157.74	
2028	113,421.88	
2029	166,730.17	
2030	245,093.35	
2031	360,287.22	
2032	529,622.21	
2033	778,544.66	
2034	1,144,460.64	
2035	1,682,357.15	
Total	5,232,553	

Nota: La figura muestra el total de las unidades al 2035, resaltando en azul los históricos provenientes del (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024) y en verde las unidades vendidas proyectadas.

Estas unidades presentadas en la figura anterior serán las existencias del 2016-2035 o población de interés, que servirán para calcular el volumen ofertado de celdas para su reciclaje, en los siguientes apartados.

5.1.3 Calculo de celdas de Ion Litio para la venta de tiempo.

Como lo establece el diseño metodológico en el capítulo 3, una vez que ya se tiene la población de vehículos del 2016-2035 o también denominadas existencias, es necesario **convertir las existencias anualizadas a número de celdas**.

Esta conversión se realiza aplicando la **fórmula 1** presentada en el capítulo 3.1.3, considerando que cada vehículo eléctrico contiene en promedio **3,692 celdas** (valor medio no asociado a una marca o modelo específico). Los resultados de este cálculo se presentan en la **tabla 25**.

Tabla 26. Conversión de existencias a celdas del año 2026 a 2045.

Año	"Existencias"	Unidades de Celdas
2016	254	937,768
2017	237	875,004

2018	205	756,860
2019	305	1,126,060
2020	449	1,657,708
2021	1,140	4,208,880
2022	5,631	20,789,652
2023	14,172	52,323,024
2024	24,290	89,678,680
2025	35,706	131,827,660
2026	52,488	193,786,660
2027	77,158	284,866,390
2028	113,422	418,753,593
2029	166,730	615,567,781
2030	245,093	904,884,639
2031	360,287	1,330,180,419
2032	529,622	1,955,365,216
2033	778,545	2,874,386,867
2034	1,144,461	4,225,348,694
2035	1,682,357	6,211,262,580
Total	5,232,553	19,318,584,133

Nota: Se toman valores promedio ya que esta aplicación no está acotada a una marca o tipo de vehículo específica.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se estima que para el año 2035 habrá un total acumulado de **19,318,584,133 celdas** correspondientes a las **5,185,870 unidades** proyectadas. Estas celdas representan el volumen potencial disponible para procesos de **reciclaje** durante la ventana de tiempo comprendida entre **2026 y 2045**, considerando una vida útil promedio de 10 años por batería.

Esta información constituye información clave para investigacio

nes futuras en el contexto mexicano relacionadas con:

- Evaluaciones de análisis de ciclo de vida (ACV).
- Procesos de reciclaje y recuperación de materiales de baterías de ion litio.
- Proyecciones del consumo de materia prima virgen, para propuestas de economía circular.

5.2. Etapa 2. Proyecto detallado.

Para esta primera iteración y como se he mencionado anteriormente, se busca aplicar la metodología para el proceso de reciclaje de baterías de Ion litio por medio del proceso de separación mecánica, para el volumen de celdas antes mencionado, proyectadas para el 2026-2045.

Sin embargo, para poder determinar la viabilidad económica de realizar el procesamiento del volumen antes mencionado, es necesario primero definir las siguientes etapas para caracterizar la planta y tener un estimado de costos **(operativos y de implementación)**

5.2.1 Características de la planta

A continuación, se muestran algunas características del proceso por separación mecánica, usando la información presentada en el capítulo 2.4.1 y algunas de las maquinas que son utilizada en este proceso, esta información es proveniente de fuentes confiables previamente citada en este capítulo.

Tabla 27. Descripción de características generales del proceso y maquinaria para el proceso de separación mecánica

Aspecto	Descripción
Características del proceso	- Permite preparar las baterías o celdas para la recuperación de materiales valiosos. - Incluye la descarga de las baterías (por inmersión en agua con polvo de hierro o mediante estaciones de descarga). - Desensamble de módulos y celdas, de forma manual o con robots de desarmado. - Trituración de las celdas para reducir su tamaño y facilitar la separación de componentes. - Separación magnética: remueve materiales ferrosos (acero, hierro). - Separación por aire: elimina plásticos, papel y separadores. - Separación por densidad: recupera metales y polvos activos, obteniendo la masa negra (<i>black mass</i>). - Secado: elimina el electrolito residual. - Proceso de baja demanda energética y maquinaria menos especializada comparado con otros métodos (pirometalúrgico o hidrometalúrgico).
Maquinaria utilizada	- Triturador o molino de baterías. - Cribas o tamices vibratorios. - Separadores magnéticos - Separadores por aire (ciclones o clasificadores).

	- Separadores por densidad o gravimétricos. - Sistemas de descarga y seguridad (baños electrolíticos, estaciones de descarga controlada).- - Equipos de secado. - Robots o estaciones manuales de desensamble.
--	---

Nota: La realización de esta tabla se realizó con la información presentada en el capítulo 2.4.1.

Como resultado hasta este punto se tiene que el análisis se realizará para: una planta de separación mecánica que tendrá una demanda acumulada de procesamiento de 19,318,584,133 celdas durante el periodo del 2026 al 2045, considerando el criterio de vida útil del apartado 5.1.1. El siguiente paso consiste en determinar los **costos totales** relacionado al procesamiento, para después hacer la comparativa con las ganancias potenciales derivada de la recuperación de materiales.

- **Selección del tipo de planta**

La elección del tipo de planta por proceso de separación mecánica se justifica por su menor demanda energética y menores requerimientos de tecnología en la maquinaria requerida en comparación con los procesos pirometalúrgico e hidrometalúrgico, tal como se sustentó en el capítulo 2.

Esto permite tener menores costos operativos y además, la recuperación de materiales de alto valor comercial, entre los cuales destaca la *black mass* (mezcla de materiales como el litio, níquel y manganeso) como se muestra **en la figura 19**.

Estos materiales pueden ser comercializada con industrias especializadas en su refinación mediante procesos hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos para la obtención de metales en su forma más pura, lo cual permite ver este proceso de separación mecánica como una etapa inicial que puede ser estratégica en la cadena de valor del reciclaje

Figura 19. Etapas del proceso de separación mecánica y sus materiales principales obtenidos



Nota: Elaborada por inteligencia artificial con la información documentada en el capítulo 2.4.1

En la figura anterior se presenta de manera ilustrativa las etapas que componen el proceso de separación mecánica para el proceso de reciclaje de baterías de ion-litio, desde su descarga hasta la obtención de sus productos finales, incluyendo el del más alto valor comercial (*black mass*), que posteriormente pueden ser refinado por procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos

5.2.2 Costos totales

Los costos totales, responden directamente al volumen de material para ser procesado durante la ventana de tiempo, tal como lo afirma la en el **capítulo 3.2**

Y para tener determinar el tamaño de la planta y costos, es necesario convertir las existencias proyectadas (en celdas) a unidades de masa (kg o toneladas según sea necesario)

De acuerdo con el capítulo 2.3, cada celda de ion litio tiene un peso promedio de **53 gramos**, lo que permite estimar el volumen total de material a procesar por año. Los resultados se presentan en la **Tabla 27**.

Tabla 28. Volumen de kilogramos y toneladas en descarte para procesar en la planta de separación mecánica del año 2026 al 2045

Año	Celdas	Kg	Toneladas
2026	937,768	49,702	50
2027	875,004	46,375	46
2028	756,860	40,114	40
2029	1,126,060	59,681	60
2030	1,657,708	87,859	88
2031	4,208,880	223,071	223
2032	20,789,652	1,101,852	1,102
2033	52,323,024	2,773,120	2,773
2034	89,678,680	4,752,970	4,753
2035	131,827,660	6,986,866	6,987
2036	193,786,660	10,270,693	10,271
2037	284,866,390	15,097,919	15,098
2038	418,753,593	22,193,940	22,194
2039	615,567,781	32,625,092	32,625
2040	904,884,639	47,958,886	47,959
2041	1,330,180,419	70,499,562	70,500
2042	1,955,365,216	103,634,356	103,634
2043	2,874,386,867	152,342,504	152,343
2044	4,225,348,694	223,943,481	223,943

2045	6,211,262,580	329,196,917	329,197
TOTALES	19,318,584,133	1,023,884,959.06	1,023,885

Nota: elaboración propia

- **Cálculo de Costos de implementación (CAPEX)**

Las **toneladas por año**, que se observan en la **tabla 27**, permiten determinar la **escala por año de la planta y sus costos de implementación (CAPEX)**.

Estos valores se calculan a partir de los rangos presentados en la **Tabla 8 del capítulo 2.4.1**, que se presenta nuevamente a continuación para referencia.

Tabla 29. Costo promedio operativo para el proceso de separación mecánica.

Tamaño de planta	Capacidad mensual	Costo operativo mensual estimado	Costo estimado mensual de implementación
Pequeña	10 – 50 toneladas	\$50,000 – \$150,000 USD	\$0.8 millones- 4.0 millones USD
Mediana	50 – 500 toneladas	\$150,000 – \$500,000 USD	\$3-20 millones USD
Grande	500 – 2,000 toneladas	\$500,000 – \$2,000,000 USD	\$15-60 millones

Nota: Adaptado de “*Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries*”, por (Lima, 2022), Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2203>

Para realizar el cálculo de los **valores intermedios para el CAPEX**, se propone la siguiente ecuación, mediante interpolación lineal, de la misma forma en la que fue realizado el **cálculo del OPEX**

Ecuación 3. Cálculo de valores intermedios de CAPEX

$$CAPEX = CAPEX_{mín} + (CAPEX_{máx} - CAPEX_{mín}) * \left[\frac{x - T_{mín}}{T_{máx} - T_{mín}} \right]$$

Donde:

- X= toneladas deseadas a procesar.
- CAPEX_{mín}= Costo estimado de implementación mensual mínimo de tabla 8.
- CAPEX_{máx}= Costo estimado de implementación mensual máximo de tabla 8.

- $T_{\min}$ = Capacidad mensual mínima de tabla 8
- $T_{\max}$ = Capacidad mensual máxima de tabla 8.

A continuación, presentamos un ejemplo aplicado al año **2026** para el tamaño de planta **pequeña**, cuyos resultados pueden verse en la **Figura 22**

- $X = 12$ toneladas (columna “Toneladas por lote” de **figura 22**, para el año 206)
- $CAPEX_{\min} = \$ 800,00$ dólares/ mes (Columna de “costo de implementación mínimo mensual estimado” de **figura 8**)
- $CAPEX_{\max} = \$ 4,000,000$ dólares/ mes (Columna de “costo de implementación máximo mensual estimado” de **figura 8**)
- $T_{\min} = 10$ ton/mes (Columna de “capacidad mensual” de **figura 8**)
- $T_{\max} = 50$ ton/mes (Columna de “capacidad mensual” de **figura 8**)

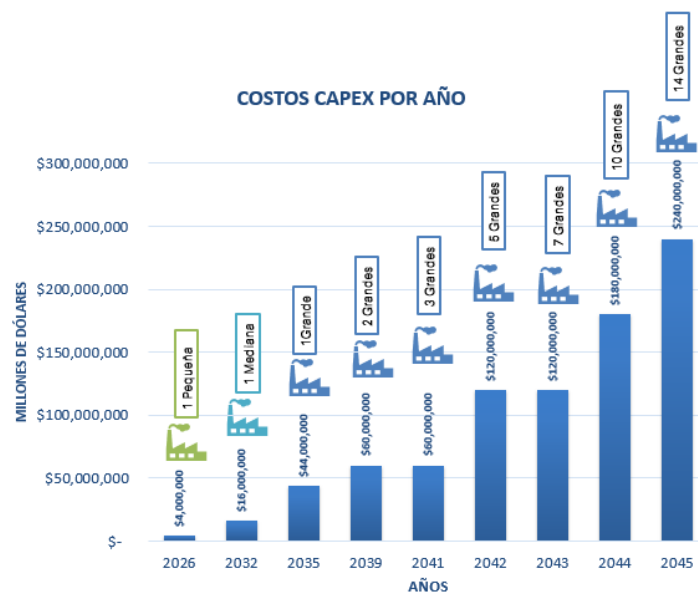
Sustituyendo:

$$CAPEX_{2026} = 800,00 + (4,000,000 - 800,000) * \left[\frac{12 - 10}{50 - 10} \right]$$

$$CAPEX_{2026} = 4,00,000$$

La **figura 20**, se muestra la aplicación de esta ecuación por año y la evolución del tamaño de la planta para el periodo 2026-2045

Figura 20. Momentos requeridos de implementación o crecimiento de planta
y costos CAPEX calculados



Nota: Las figuras de una fábrica dentro de la gráfica en color **verde** representa infraestructura **pequeña**, en color **azul claro** infraestructura **mediana** y en color **azul oscuro** infraestructura **grande**.

En a **figura 20**, se muestran los costos de implementación, así como los momentos requeridos de crecimiento de infraestructura, y se destacan los siguientes hallazgos:

- **2026-2031:** Inversión inicial de una **infraestructura pequeña** y **operativa** hasta **2031**.
- **2032-2034:** Inversión para infraestructura **mediana**, considerando la infraestructura **existente** y siendo **operativa** hasta el **2034**.
- **2035-2045:** Inversión para infraestructura **grande**, considerando la infraestructura **existente** y considerando lo siguiente:

Del año **2039** al **2045** **no es suficiente** con **1 planta grande** a su **máxima capacidad** y se requiere implementar la siguiente cantidad **aproximada** de **plantas totales** operativas por año:

- **2039** - 2 plantas **grandes**.
- **2040** - 2 plantas **grandes**.
- **2041** - 3 plantas **grandes**.
- **2042** - 5 plantas **grandes**.
- **2043** - 7 plantas **grandes**.

- **2044 - 10 plantas grandes.**
- **2045 - 14 plantas grande**

El calculo anterior del CAPEX, fue realizado contemplando la infraestructura existente mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Cálculo de CAPEX por crecimiento requerido de tamaño de planta

$$CAPEX_t = CAPEX_{nuevo} - CAPEX_{existente}$$

Donde:

CAPEX_t= capital adicional requerido en el año **t**, debido a la necesidad de crecimiento en la capacidad de la planta.

CAPEX nuevo= inversión asociada al nuevo tamaño de planta, referirse tabla 8.

CAPEX existente= capital ya implementado en la infraestructura existente.

Se aplica la ecuación, obteniendo resultados presentados en la figura anterior número 21.

Ejemplo:

En el 2026 se inicia la primera producción de la planta de tamaño **pequeño** para el proceso de separación mecánica, por lo que se requiere **una inversión inicial de \$ 4,000,000 dólares**, este resultado es obtenido de la aplicación de la ecuación 5, explicado anteriormente mediante un ejemplo práctico.

Del **2026 al 2031** la capacidad máxima de la planta de pequeña es **suficiente** para procesar las celdas disponibles, sin embargo, en el año **2032**, es necesario hacer un **crecimiento de una infraestructura pequeña a mediana**, lo cual requiere la aplicación de la ecuación 6 de la siguiente manera:

$$CAPEX_{2032} = \$20,000,000 - 4,000,000$$

$$CAPEX_{2032} = \$16,000,000 \text{ dolares}$$

Esto significa que para el año 2032 se requiere hacer **nuevamente una inversión de \$16,000,00 dólares**, para hacer el crecimiento de una infraestructura **chica a mediana**, considerando que la inversión de la planta mediana se hará a su máxima capacidad (500 tonelada/mes), ahora que ya se conoce el volumen ofertado de celdas para los siguientes años.

Cálculo de Costos operativos (OPEX)

Una vez definido el tamaño de planta, en el apartado anterior de cálculo de CAPEX, es necesario calcular los costos operativos de las plantas.

Como se puede observar en la **tabla 8**, los valores son rangos estimados de costos operativos mensuales en función de la capacidad mensual. Sin embargo, como no se cuenta con un valor exacto para los **costos intermedios** entre los límites inferiores y superiores de cada rango, **se propone realizar una estimación usando la siguiente formula de interpolación lineal** que permita calcular el costo de volúmenes procesados que estén en el intermedio de los rangos de la capacidad mensual de la planta y costos operativos mensuales, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Cálculo de valores intermedios de OPEX

$$OPEX \text{ mensual calculado} = OPEX_{\text{mín}} + (OPEX_{\text{máx}} - OPEX_{\text{mín}}) * \left[\frac{x - T_{\text{mín}}}{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}} \right]$$

Donde:

- X= toneladas deseadas a procesar.
- OPEX_{mín}= Costo operativo mensual mínimo de tabla 8.
- OPEX_{máx}= Costo operativo mensual máximo de tabla 8.
- T_{mín}= Capacidad mensual mínima de tabla 8
- T_{máxima}= Capacidad mensual mínima de tabla 8.

Para ilustrar el procedimiento, se toma como ejemplo el año **2026, presentado en la figura 20**, correspondiente a una planta **pequeña**, con los siguientes valores:

Donde:

- X= 12 toneladas (columna “Toneladas por lote” de **figura 20**, para el año 206)
- OPEX_{mín}= \$ 50,000 dólares/ mes (Columna de “costo operativo mensual estimado” de **figura 8**)
- OPEX_{máx}= \$ 150,000 dólares/ mes (Columna de “costo operativo mensual estimado” de **figura 8**)
- T_{mín}= 10 ton/mes (Columna de “capacidad mensual” de **figura 8**)

- Tmáxima= 50 ton/mes (Columna de “capacidad mensual” de **figura 8**)

Sustituyendo los valores de la **ecuación 3**:

$$OPEX \text{ mensual calculado} = 50,000 + (150,000 - 50,000) * \frac{12 - 10}{50 - 10}$$

El costo operativo mensual estimado para el año 2026, es de 55,000 dólares/mes

Para calcular el costo anual equivalente, se emplea la siguiente ecuación

Ecuación 6. Cálculo OPEX/año

$$OPEX_{\text{año}} = N^{\circ} \text{ de lotes por año } (OPEX \text{ mensual calculado})$$

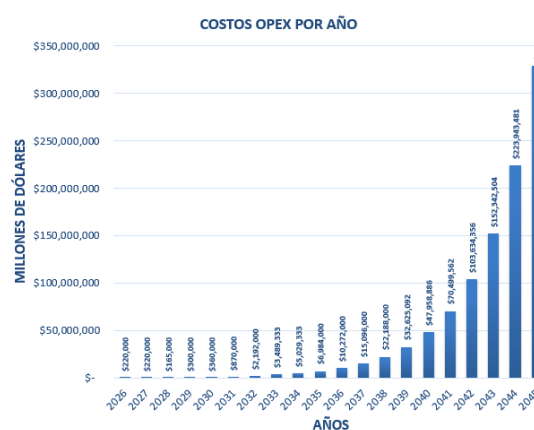
$$OPEX_{\text{año}} = 4 (\$55,000 \text{ dolares/mes})$$

$$OPEX_{2026} = 220,000 \text{ dólares/año}$$

De esta forma al aplicar la ecuación 3 y 4, para cada año entre el 2026-2045 se obtiene los costos operativos anuales ajustados a la capacidad real de procesamiento, considerando las variaciones de tamaño de planta y volumen de celdas disponibles.

La **figura 21**, muestra el comportamiento de esta variación a lo largo del periodo analizado.

Figura 21. Costos OPEX calculados



Nota: Cálculos realizados a partir de la conversión del volumen proyectado de celdas (2026–2045) a toneladas y la aplicación de ecuaciones 3 y 4. Las toneladas por año fueron redondeadas a valores enteros, por lo que los resultados con aproximado.

En la **figura anterior**, se presenta el comportamiento de costos operativos de planta requerido, en función del volumen mensual de celda disponibles para su reciclaje, así como el costo operativo por mes.

Los principales hallazgos hasta este punto son los siguientes:

- **2026-2031- infraestructura pequeña:** El volumen de baterías es menor que la capacidad mínima de la planta por lo que requiere una operación intermitente dividida de la siguiente manera:
 - **2026: 4 lotes por año**
 - **2027: 4 lotes por año**
 - **2028: 3 lotes por año**
 - **2029: 6 lotes por año**
 - **2030: 6 lotes por año**
- **2032-2034- Infraestructura mediana:** La **demand**a anual es **suficiente** para que la planta opere los **12 meses** por año En **2032**, el incremento de volumen requiere **escalar de planta pequeña a planta mediana**.
- **2035-2045- Infraestructura grande.**
- **2039-2045:** La demanda supera la capacidad máxima de la planta y por lo tanto OPEX se multiplica en función de la planta operativa determinadas en el cálculo de CAPEX.

Cálculo de costos totales por año

El costo total anual se determina sumando los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos (OPEX), tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 22. Costos toles

Año	CAPEX	OPEX	COSTOS TOTALES POR AÑO (CAPEX+OPEX)
2026	\$ 4,000,000	\$ 220,000	\$ 4,220,000
2027		\$ 220,000	\$ 220,000
2028		\$ 165,000	\$ 165,000
2029		\$ 300,000	\$ 300,000
2030		\$ 360,000	\$ 360,000
2031		\$ 870,000	\$ 870,000
2032	\$ 16,000,000	\$ 2,192,000	\$ 18,192,000
2033		\$ 3,489,333	\$ 3,489,333
2034		\$ 5,029,333	\$ 5,029,333
2035	\$ 44,000,000	\$ 6,984,000	\$ 50,984,000
2036		\$ 10,272,000	\$ 10,272,000
2037		\$ 15,096,000	\$ 15,096,000
2038		\$ 22,188,000	\$ 22,188,000
2039	\$ 60,000,000	\$ 32,625,092	\$ 92,625,092
2040	\$ -	\$ 47,958,886	\$ 47,958,886
2041	\$ 60,000,000	\$ 70,499,562	\$ 130,499,562
2042	\$ 120,000,000	\$ 103,634,356	\$ 223,634,356
2043	\$ 120,000,000	\$ 152,342,504	\$ 272,342,504
2044	\$ 180,000,000	\$ 223,943,481	\$ 403,943,481
2045	\$ 240,000,000	\$ 329,196,917	\$ 569,196,917

Nota: Cálculos realizados a partir de la conversión del volumen proyectado de celdas (2026–2045) a toneladas y la aplicación de ecuaciones 2,3 y 4. Las toneladas por año fueron redondeadas a valores enteros, por lo que los resultados con aproximado.

Este valor se utilizará posteriormente para comparar con las ganancias potenciales anuales derivadas de la recuperación de materiales valiosos, con el fin de identificar si existe punto de equilibrio económico del proyecto en el periodo analizado.

5.3 Procesamiento.

Una vez que se ha determinado y justificado la elección del tipo de planta y sus costos totales (CAPEX + OPEX), es necesario estimar los ingresos potenciales derivados de la recuperación de materiales durante el proceso de reciclaje y para ellos, se siguen los siguientes pasos, de acuerdo con el diseño metodológico propuesto.

5.3.1 Determinar el porcentaje de materiales recuperados:

En el Capítulo 2.4.1 se presentó el precio de los materiales obtenidos por el proceso de una planta de separación mecánica, específicamente en la tabla 9, la cual se muestra nuevamente a continuación, con el fin de facilitar los cálculos posteriores.

Tabla 30. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso de separación mecánica.

Material	% Recuperado	Valor promedio (USD/kg)
<i>Black mass</i> (NMC, grafito)	30–40%	\$5–\$25
Aluminio	8–10%	\$2–\$5
Cobre	10–15%	\$8–\$10
Plásticos / Separadores	15–20%	~\$0 (valor bajo, no comercializable)
Acero / Hierro	5–10%	\$0.3 – \$0.5
Residuos / Electrolito	5–10%	No recuperable en mecánica

Nota: Adaptado de “Unlocking Economic and Environmental Gains Through Lithium-Ion Battery Recycling for Electric Vehicle”, por. (Chigbu, 2024).

A partir de los datos de la tabla 9, se puede observar que el porcentaje de recuperación de cada material valioso varía dentro de un rango superior y otro inferior. Por esta razón, se decide calcular el porcentaje recuperado para cada material considerando tanto el límite inferior como el límite superior de este rango, para aplicarlos al volumen total de celdas proyectado para el periodo 2026-2045.

De esta manera se establecen dos escenarios de recuperación para los cálculos de los porcentajes de material recuperado:

- Escenario optimista: considera el rango superior de porcentaje de recuperación, suponiendo que el proceso opere a su máxima eficiencia posible.
- Escenario pesimista: considera el rango inferior de porcentaje de recuperación, suponiendo que el proceso opere a una menor eficiencia.

A continuación se muestran los cálculos realizados considerando los escenarios de recuperación optimistas y pesimistas antes mencionados contra el volumen de celdas (kg) por año del 2026-2045:

Figura 23. Kilogramos de material valiosos recuperados del año 2026-2045

	% recuperado pesimista: 30%	% recuperado optimista: 40%	% recuperado pesimista: 8%	% recuperado optimista: 10%	% recuperado pesimista: 10%	% recuperado optimista: 15%	% recuperado pesimista: 5%	% recuperado optimista: 10%
Año	KG de Black mass recuperado	KG de Black mass recuperado	KG de Aluminio recuperado	KG de Aluminio recuperado	KG de Cobre Recuperado	KG de Cobre Recuperado	KG de Hierro y Acero Recuperado	KG de Hierro y Acero Recuperado
2,026	14,911	19,881	3,976	4,970	4,970	7,455	2,485	4,970
2,027	13,913	18,550	3,710	4,638	4,638	6,956	2,319	4,638
2,028	12,034	16,045	3,209	4,011	4,011	6,017	2,006	4,011
2,029	17,904	23,872	4,774	5,968	5,968	8,952	2,984	5,968
2,030	26,358	35,143	7,029	8,786	8,786	13,179	4,393	8,786
2,031	66,921	89,228	17,846	22,307	22,307	33,461	11,154	22,307
2,032	330,555	440,741	88,148	110,185	110,185	165,278	55,093	110,185
2,033	831,936	1,109,248	221,850	277,312	277,312	415,968	138,656	277,312
2,034	1,425,891	1,901,188	380,238	475,297	475,297	712,946	237,649	475,297
2,035	2,096,060	2,794,746	558,949	698,687	698,687	1,048,030	349,343	698,687
2,036	3,081,208	4,108,277	821,655	1,027,069	1,027,069	1,540,604	513,535	1,027,069
2,037	4,529,376	6,039,167	1,207,833	1,509,792	1,509,792	2,264,688	754,896	1,509,792
2,038	6,658,182	8,877,576	1,775,515	2,219,394	2,219,394	3,329,091	1,109,697	2,219,394
2,039	9,787,528	13,050,037	2,610,007	3,262,509	3,262,509	4,893,764	1,631,255	3,262,509
2,040	14,387,666	19,183,554	3,836,711	4,795,889	4,795,889	7,193,833	2,397,944	4,795,889
2,041	21,149,869	28,199,825	5,639,965	7,049,956	7,049,956	10,574,934	3,524,978	7,049,956
2,042	31,090,307	41,453,743	8,290,749	10,363,436	10,363,436	15,545,153	5,181,718	10,363,436
2,043	45,702,751	60,937,002	12,187,400	15,234,250	15,234,250	22,851,376	7,617,125	15,234,250
2,044	67,183,044	89,577,392	17,915,478	22,394,348	22,394,348	33,591,522	11,197,174	22,394,348
2,045	98,759,075	131,678,767	26,335,753	32,919,692	32,919,692	49,379,538	16,459,846	32,919,692
Total	307,165,488	409,553,984	81,910,797	102,388,496	102,388,496	153,582,744	51,194,248	102,388,496

Los kilogramos de materiales valiosos (*Black mass*, Aluminio, Cobre Hierro y Acero), presentados en la tabla anterior, serán utilizado en la siguiente etapa para determinar el monto de las ganancias potenciales totales para este caso de estudio.

5.3.2 Ganancias potenciales.

En la tabla 9, previamente presentada, podemos observar que también se encuentran un rango superior del valor promedio de los materiales valiosos y un valor inferior, por lo que serán tomados nuevamente como:

- Escenario optimista de ganancias potenciales: considera el rango superior del valor promedio kg/dólar del material recuperado presentado en el capítulo 5.3.1, suponiendo que el proceso opere a su máxima eficiencia posible.
- Escenario pesimista de ganancias potenciales: considera el rango inferior del valor promedio kg/dólar del material recuperado presentado en el capítulo 5.3.1, suponiendo que el proceso opere a su máxima eficiencia posible

En la siguiente figura se muestra el cálculo de las ganancias por año 2026-2045 así como el acumulado total de las ganancias potenciales, Considerando que, a partir del año 2039, las ganancias potenciales son ficticias, ya que como se mencionó en el capítulo 5.2.2 de costos operativos; del año 2039-2045, la capacidad máxima de la planta de separación mecánica no es suficiente para procesar el volumen de celdas proyectado.

Figura 24. Ganancias potenciales del año 2026-2045

Año	Kg de celdas	Ganacia kg/USD Black Mass	Ganacia kg/USD Black Mass	Ganacia kg/USD Aluminio	Ganacia kg/USD Aluminio	Ganacia kg/USD Cobre	Ganacia kg/USD Cobre
2026	49,702	\$ 74,553	\$ 497,017	\$ 7,952	\$ 24,851	\$ 39,761	\$ 74,553
2027	46,375	\$ 69,563	\$ 463,752	\$ 7,420	\$ 23,188	\$ 37,100	\$ 69,563
2028	40,114	\$ 60,170	\$ 401,136	\$ 6,418	\$ 20,057	\$ 32,091	\$ 60,170
2029	59,681	\$ 89,522	\$ 596,812	\$ 9,549	\$ 29,841	\$ 47,745	\$ 89,522
2030	87,859	\$ 131,788	\$ 878,585	\$ 14,057	\$ 43,929	\$ 70,287	\$ 131,788
2031	223,071	\$ 334,606	\$ 2,230,706	\$ 35,691	\$ 111,535	\$ 178,457	\$ 334,606
2032	1,101,852	\$ 1,652,777	\$ 11,018,516	\$ 176,296	\$ 550,926	\$ 881,481	\$ 1,652,777
2033	2,773,120	\$ 4,159,680	\$ 27,731,203	\$ 443,699	\$ 1,386,560	\$ 2,218,496	\$ 4,159,680
2034	4,752,970	\$ 7,129,455	\$ 47,529,700	\$ 760,475	\$ 2,376,485	\$ 3,802,376	\$ 7,129,455
2035	6,986,866	\$ 10,480,299	\$ 69,868,660	\$ 1,117,899	\$ 3,493,433	\$ 5,589,493	\$ 10,480,299
2036	10,270,693	\$ 15,406,039	\$ 102,706,930	\$ 1,643,311	\$ 5,135,346	\$ 8,216,554	\$ 15,406,039
2037	15,097,919	\$ 22,646,878	\$ 150,979,187	\$ 2,415,667	\$ 7,548,959	\$ 12,078,335	\$ 22,646,878
2038	22,193,940	\$ 33,290,911	\$ 221,939,404	\$ 3,551,030	\$ 11,096,970	\$ 17,755,152	\$ 33,290,911
2039	32,625,092	\$ 48,937,639	\$ 326,250,924	\$ 5,220,015	\$ 16,312,546	\$ 26,100,074	\$ 48,937,639
2040	47,958,886	\$ 71,938,329	\$ 479,588,858	\$ 7,673,422	\$ 23,979,443	\$ 38,367,109	\$ 71,938,329
2041	70,499,562	\$ 105,749,343	\$ 704,995,622	\$ 11,279,930	\$ 35,249,781	\$ 56,399,650	\$ 105,749,343
2042	103,634,356	\$ 155,451,535	\$ 1,036,343,564	\$ 16,581,497	\$ 51,817,178	\$ 82,907,485	\$ 155,451,535
2043	152,342,504	\$ 228,513,756	\$ 1,523,425,039	\$ 24,374,801	\$ 76,171,252	\$ 121,874,003	\$ 228,513,756
2044	223,943,481	\$ 335,915,221	\$ 2,239,434,808	\$ 35,830,957	\$ 111,971,740	\$ 179,154,785	\$ 335,915,221
2045	329,196,917	\$ 493,795,375	\$ 3,291,969,168	\$ 52,671,507	\$ 164,598,458	\$ 263,357,533	\$ 493,795,375
Total	1,023,884,959	\$ 1,535,827,439	\$ 10,238,849,591	\$ 163,821,593	\$ 511,942,480	\$ 819,107,967	\$ 1,535,827,439

Las ganancias potenciales presentadas en la **Tabla 24** serán comparadas con los costos totales de inversión y operación (CAPEX + OPEX) en el capítulo siguiente, con el propósito de determinar el punto de equilibrio dentro del periodo analizado. Este ejercicio permitirá evaluar la viabilidad económica de implementar una planta de separación mecánica cuya capacidad pueda ajustarse dinámicamente al volumen proyectado de celdas a procesar, particularmente durante el periodo 2026–2038, en el cual una planta de escala actual resulta suficiente para atender la demanda de procesamiento sin requerir expansión de capacidad

Hasta este punto se puede realizar un análisis costo-beneficio, es decir comparar las ganancias contra los costos totales por año. A continuación en las siguientes dos figuras se muestran resaltadas los años donde las ganancias fueron mayores que los costos totales

Figura 25. Costo-beneficio escenario pesimista

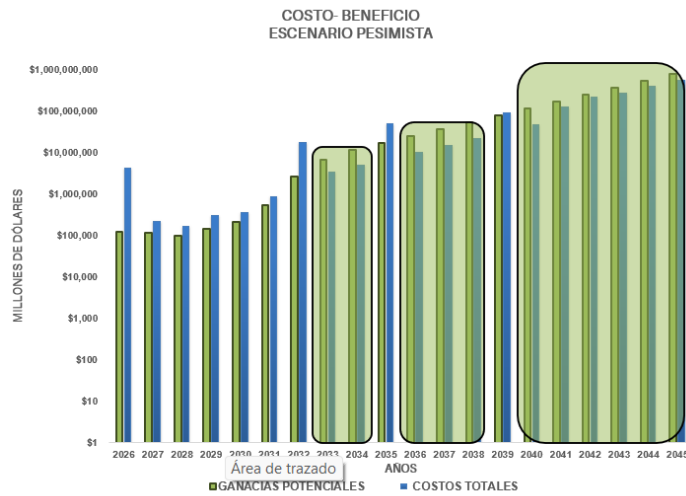
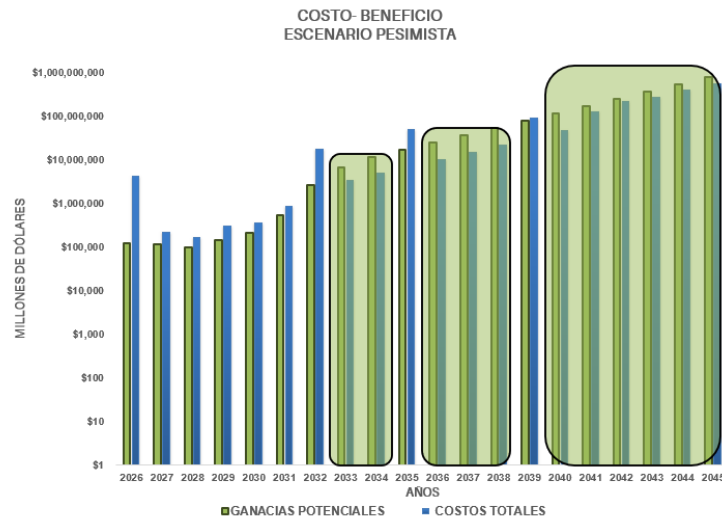


Figura 26. Costo-beneficio escenario optimista



En esta **figura 25 y 26**, podemos observar **periodos de balance costo beneficio positivo** para ambos escenarios distinta ventanas de tiempo.

Para el escenario pesimista, tenemos las siguientes:

- 2033-2034
- 2036-2038
- 2040-2045

Optimista:

- 2027-2031
- 2033-2045

Estos balances positivos solo indican que las **ganancias** han **superado** a los costos totales **del año que se está evaluando, sin contemplar** que puede aún no **haber sido recuperado la inversión de los años anteriores**, por lo que no se habla de un estado de viabilidad o inviabilidad hasta este punto, eso será calculado en el siguiente apartado.

5.4 Viabilidad.

Una vez calculados los **costos totales** asociados a la operación de la planta de **separación mecánica** (CAPEX + OPEX) en función del **volumen de material proyectado para el periodo 2026–2045** y sus ganancias potenciales calculadas en el apartado anterior, es necesario realizar un análisis que contemple la viabilidad anual

Este análisis de viabilidad se realiza de forma anualizada, pero considerando el comportamiento costo-beneficio y costos de inversiones de los años anteriores, donde podemos encontrar escenario de **inviabilidad** por las posibles siguientes causas

- Las **ganancias** obtenidas son **menores** que los **costos totales** anuales, causando un balance **costo- beneficio negativo**.
- El **balance costo-beneficio es positivo**, pero los **años anteriores** hubo un **balance costo beneficio negativo** (estado de **perdida**), y este balance positivo es menor que la pérdida.
- La **inversión de CAPEX**, de **años anteriores**, **no** ha logrado ser **recuperada** o su **inversión** del año **actual supera** el balance costo- beneficio.
- El **balance costo beneficio es positivo**, pero **no** es **suficiente** para recuperar la **pérdida** del **año anterior**.

A continuación se muestra en análisis de viabilidad del escenario optimista y pesimista de este caso de estudio:

Figura 27. Análisis de viabilidad para escenario pesimista

Costos totales	Costo-Beneficio	Cálculo de viabilidad	Criterio de	Análisis	Plantas operativas	Infraestructura	Año
\$ 4,220,000	-\$ 4,096,988		Inviabile	Costos totales mayores que las ganancias potenciales	1	Pequeña	2026
\$ 220,000	-\$ 105,221		Inviabile	Costos totales mayores que las ganancias potenciales	1	Pequeña	2027
\$ 165,000	-\$ 65,719		Inviabile	Costos totales mayores que las ganancias potenciales	1	Pequeña	2028
\$ 300,000	-\$ 152,289		Inviabile	Costos totales mayores que las ganancias potenciales	1	Pequeña	2029
\$ 360,000	-\$ 142,550		Inviabile	Costos totales mayores que las ganancias potenciales	1	Pequeña	2030
\$ 870,000	-\$ 317,900	-\$ 4,880,668	Inviabile	Costos totales mayores que las ganancias potenciales	1	Pequeña	2031
\$ 18,192,000	-\$ 15,464,917	-\$ 20,345,585	Inviabile	Requerimiento de crecimiento de infraestructura	1	Mediana	2032
\$ 3,489,333	\$ 3,374,139	-\$ 16,971,446	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recuperar la inversión anterior	1	Mediana	2033
\$ 5,029,333	\$ 6,734,268	-\$ 10,237,178	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recuperar la inversión anterior	1	Mediana	2034
\$ 50,984,000	-\$ 33,691,507	-\$ 43,928,685	Inviabile	Requerimiento de crecimiento de infraestructura	1	Grande	2035
\$ 10,272,000	\$ 15,147,965	-\$ 28,780,720	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recuperar la inversión anterior	1	Grande	2036
\$ 15,096,000	\$ 22,271,349	-\$ 6,509,371	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recuperar la inversión anterior	1	Grande	2037
\$ 22,188,000	\$ 32,742,003	\$ 26,232,631	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la inversión anterior	1	Grande	2038
\$ 92,625,092	-\$ 11,877,989	-\$ 14,354,642	Viable	Balance costo- beneficio negativo, sin embargo sí permite recuperar la inversión anterior	2	Grande	2039
\$ 47,958,886	\$ 70,739,357	\$ 85,093,999	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la inversión anterior	2	Grande	2040
\$ 130,499,562	\$ 43,986,854	\$ 129,080,853	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la inversión anterior	3	Grande	2041
\$ 223,634,356	\$ 32,860,676	\$ 161,941,529	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la inversión anterior	5	Grande	2042
\$ 272,342,504	\$ 104,705,193	\$ 266,646,722	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la inversión anterior	7	Grande	2043
\$ 403,943,481	\$ 150,316,634	\$ 416,963,356	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la inversión anterior	10	Grande	2044
\$ 569,196,917	\$ 245,565,452	\$ 662,528,809	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la inversión anterior	14	Grande	2045

Figura 28. Análisis de viabilidad para escenario optimista

Año	CAPEX	OPEX	Costos totales	Costo-Beneficio	Cálculo de viabilidad	Criterio de	Análisis	Plantas operativas	Infraestructura	Año
2026	\$ 4,000,000	\$ 220,000	\$ 4,220,000	-\$ 3,621,094		Inviabile	Costos totales mayores que las ganancias potenciales	1	Pequeña	2026
2027	\$ -	\$ 220,000	\$ 220,000	\$ 338,821	-\$ 3,282,273	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recupe	1	Pequeña	2027
2028	\$ -	\$ 165,000	\$ 165,000	\$ 318,369	-\$ 2,963,905	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recupe	1	Pequeña	2028
2029	\$ -	\$ 300,000	\$ 300,000	\$ 419,158	-\$ 2,544,746	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recupe	1	Pequeña	2029
2030	\$ -	\$ 360,000	\$ 360,000	\$ 698,695	-\$ 1,846,051	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recupe	1	Pequeña	2030
2031	\$ -	\$ 870,000	\$ 870,000	\$ 1,818,001	-\$ 28,050	Inviabile	Balance costo- beneficio positivo pero no permite recupe	1	Pequeña	2031
2032	\$ 16,000,000	\$ 2,192,000	\$ 18,192,000	-\$ 4,914,689	-\$ 4,942,739	Inviabile	Requerimiento de crecimiento de infraestructura	1	Mediana	2032
2033	\$ -	\$ 3,489,333	\$ 3,489,333	\$ 29,926,766	\$ 24,984,027	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	1	Mediana	2033
2034	\$ -	\$ 5,029,333	\$ 5,029,333	\$ 52,243,956	\$ 77,227,983	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	1	Mediana	2034
2035	\$ 44,000,000	\$ 6,984,000	\$ 50,984,000	\$ 33,207,735	\$ 110,435,718	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	1	Grande	2035
2036	\$ -	\$ 10,272,000	\$ 10,272,000	\$ 113,489,850	\$ 223,925,568	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	1	Grande	2036
2037	\$ -	\$ 15,096,000	\$ 15,096,000	\$ 166,833,920	\$ 390,759,488	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	1	Grande	2037
2038	\$ -	\$ 22,188,000	\$ 22,188,000	\$ 245,248,982	\$ 636,008,470	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	1	Grande	2038
2039	\$ 60,000,000	\$ 32,625,092	\$ 92,625,092	\$ 300,507,271	\$ 936,515,741	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	2	Grande	2039
2040	\$ -	\$ 47,958,886	\$ 47,958,886	\$ 529,945,689	\$ 1,466,461,429	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	2	Grande	2040
2041	\$ 60,000,000	\$ 70,499,562	\$ 130,499,562	\$ 719,020,162	\$ 2,185,481,592	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	3	Grande	2041
2042	\$ 120,000,000	\$ 103,634,356	\$ 223,634,356	\$ 1,025,159,638	\$ 3,210,641,230	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	5	Grande	2042
2043	\$ 120,000,000	\$ 152,342,504	\$ 272,342,504	\$ 1,563,384,669	\$ 4,774,025,899	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	7	Grande	2043
2044	\$ 180,000,000	\$ 223,943,481	\$ 403,943,481	\$ 2,294,575,463	\$ 7,068,601,361	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	10	Grande	2044
2045	\$ 240,000,000	\$ 329,196,917	\$ 569,196,917	\$ 3,397,625,930	\$ 10,466,227,292	Viable	Balance costo- beneficio positivo y sí permite recuperar la	14	Grande	2045

Del análisis presentado en las figuras 27 y 28 se concluye que:

En un **escenario pesimista**:

2026-2037: es **inviabile** la implementación de una planta de separación mecánica.

2038-2045: es **viable**, con un total de **14** plantas **operativas** al **2045**.

Mientras que en un escenario optimista:

- **2026-2032:** es **inviabile** la implementación de una planta de separación mecánica
- **2033-2045:** es **viable**, con un total de **14** plantas **operativas** al **2045**

6. Discusión final

6.1. Consecuencias de la aplicación de la estrategia de innovación

La aplicación de la metodología desarrollada permitió obtener una visión integral sobre la viabilidad técnica y económica de implementar una planta de reciclaje por separación mecánica de baterías de ion litio provenientes de vehículos eléctricos en México. A través del proceso de análisis e investigación, se logró evidenciar el comportamiento económico del sistema de reciclajes bajo distintos escenarios de análisis, así como sus limitaciones operativas por falta capacidad de procesamiento de este tipo de plantas.

Los resultados mostraron que, aun cuando el proceso de separación mecánica permite recuperar materiales de alto valor comercial (como el cobre, aluminio y black mass), la viabilidad del sistema depende directamente de el volumen procesado, los costos de operación (OPEX), la inversión inicial (CAPEX) y obtención de materiales valiosos.

El análisis comparativo entre escenarios optimista y pesimista reveló que, sin una ampliación de capacidad o la integración de procesos complementarios ya antes mencionados, la viabilidad económica del proyecto se mantiene limitada a periodos cortos de operación (2027-2029, tabla 26)

En términos generales, la aplicación de esta metodología propuesta demostró su efectividad para identificar los rangos de viabilidad y las condiciones de operación, siendo una herramienta útil para la planificación de infraestructura, consideración de riesgos económicos y la toma de decisiones estratégicas.

6.1.1. Aspectos de mejora para intervenciones subsecuentes

Al aplicar la metodología al caso de estudio, se identificó la necesidad de incluir en el diseño metodológico de análisis de viabilidad un apartado que permita evaluar el posible incremento o decremento en los precios de venta de los materiales obtenidos mediante el proceso de reciclaje por separación mecánica.

Considerando que en el Capítulo 1 se establece que la disponibilidad de materias primas vírgenes tenderá a disminuir conforme aumente la demanda derivada de la fabricación y comercialización de vehículos eléctricos, resulta indispensable incorporar en futuros análisis la variación potencial en los precios de los materiales recuperados.

Este ajuste permitiría obtener resultados de viabilidad más realistas, al reflejar el impacto económico que puede generar el aumento del valor de los materiales valiosos recuperados mediante la separación mecánica y a su vez en su punto de equilibrio sugiriendo considerarlo para las siguientes iteraciones.

6.2. Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso

La presente investigación tiene relevancia y trascendencia al abordar una problemática emergente y de alto impacto dentro del ámbito de la ingeniería y la sostenibilidad industrial: el reciclaje de baterías de ion de litio en el contexto de la electromovilidad. Al identificar y analizar la ausencia de infraestructura y de estrategias nacionales para el tratamiento de estos residuos en México, el estudio contribuye a llenar un vacío de conocimiento técnico y metodológico en torno a la gestión sustentable de baterías en etapa de descarte. Asimismo, la propuesta metodológica desarrollada para el análisis de viabilidad de una planta de separación mecánica constituye una herramienta aplicable para la toma de decisiones en materia de políticas públicas y planeación industrial, fortaleciendo el vínculo entre la investigación académica y la implementación práctica de soluciones sostenibles. En conjunto, esta tesis representa una contribución significativa al desarrollo de modelos de economía circular y a la transición hacia una industria automotriz más responsable con el medio ambiente desde un contexto nacional o de cualquier país que busque aplicar la metodología como una herramienta preliminar

Referencias bibliográficas

- The International Energy Agency (IEA). (2022). Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2021). *Net Zero by 2050*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Alibaba. (2024). Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/2-Ton-Capacity-Rotary-Melting-Furnace-50033723712.html>
- American Chemical Society (CAS). (2022). Obtenido de <https://www.cas.org/resources/cas-insights/lithium-ion-battery-recycling>
- American Chemical Society Research team. (2022). Lithium ion battery recycling: A Review of the Current Methods and Global Developments.
- Atkins, J. (2022). Obtenido de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles>
- Bouckaert, S. P. (Mayo de 2021). *OECD Publishing*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- BYD, A. (2024). *Información de Garantía BYD*. Obtenido de <https://www.byd.com/mx/service-maintenance/warranty-policy.html>
- Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). (2021). *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista*. Obtenido de https://www.cenace.gob.mx/Docs/10_PLANEACION/ProgramasAyM/Programa%20de%20Ampliaci%C3%B3n%20y%20Modernizaci%C3%B3n%20de%20la%20RNT%20y%20RGD%202021%20-%2020235.pdf

- Chigbu, B. I. (2024). Unlocking Economic and Environmental Gains Through Lithium-Ion Battery Recycling for Electric Vehicles. . *Resources*, pág. 163.
- CIC ENERGI GUNE. (2025). *¿Por qué formato apuestan los grandes fabricantes de celdas para baterías? ¿Prismáticas, cilíndricas o pouch?* Obtenido de CIC ENERGI GUNE: <https://cicenergigune.com/es/blog/formato-celdas-baterias-fabricantes-prismaticas-cilindricas-pouch>
- Dingxin, Y. (2021). *Reciclaje de baterías de litio para vehículos eléctricos*. Barcelona.
- EPA, U. S. (2024). *Lithium Ion Battery Recycling*. Obtenido de <https://www.epa.gov/hw/lithium-ion-battery-recycling>
- EV database. (2023). *Tesla Model 3*. Obtenido de EV database: <https://ev-database.org/car/1555/Tesla-Model-3>
- EV, R. (2023). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=XUtrSAJyHV4>
- Forbes México. (2021). *Prevén que 29% de los vehículos vendidos en 2035 sean eléctricos, lejos de la meta para 2040*. Obtenido de <https://forbes.com.mx/preven-que-29-de-los-vehiculos-vendidos-en-2035-sean-electricos-lejos-de-la-meta-para-2040/>
- Gaines, L. (2014). *Science direct*. Obtenido de The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993714000037>
- Gaines, L. (2018). *Science Direct*. Obtenido de Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course.
- García, J. M. (2016). *Análisis de viabilidad de una planta de reciclado de*. Obtenido de e-Reading: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90759/>
- GMC. (2024). Obtenido de <https://www.honolulugmc.com/ev-tips/how-do-hybrid-cars-work/>
- Granata, Ferreira, Petrides. (2020). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/340581568_Lithium_Ion_Battery_Recycling_-_Techno-Economic_Assessment_and_Process_Optimization_with_SuperPro_Designer

- Guanma Machinery. (2025). Obtenido de <https://www.guanmarecycle.com/lithium-ion-battery-recycling-plant-setup/>
- IEA, I. E. (2024). *Global EV Outlook*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). Históricos de ventas de autos eléctricos en México. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?px=RAIAVL_11&bd=RAIAVL
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Trends in electric light-duty vehicles*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022/trends-in-electric-light-duty-vehicles>
- LARGE. (2025). *LARGE*. Obtenido de <https://es.large.net/product/8ju43e5.html>
- Lima. (2022). Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2203>
- Lima,Pontes,Vasconcelos,Silva,Wu. (2022). *Report Linker*. Obtenido de Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries: https://www.reportlinker.com/market-report/Battery/726619/Lithium-Ion-Battery-Recycling?term=lithium%20ion%20battery%20recycling%20market&matchtype=p&loc_interest=&loc_physical=9140411&utm_group=standard&utm_term=lithium%20ion%20battery%20recycling%20mark
- López Hernández, V. H. (2024). *Reciclaje y reuso de baterías de litio en América Latina y el Caribe: revisión analítica de prácticas globales y regionales*. EUA.
- Maria Cecília Costa Lima 1, *. L. (2022). Obtenido de https://www.researchgate.net/journal/Energies-1996-1073/publication/359384334_Economic_Aspects_for_Recycling_of_Used_Lithium-Ion_Batteries_from_Electric_Vehicles/links/680a4faad1054b0207de4beb/Economic-Aspects-for-Recycling-of-Used-Lithium-Ion-Batteries-f

- McKinsey & Company. (2023). *Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular*. Obtenido de <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>
- McKinsey & Company. (2023). *Battery demand is growing—and so is the need for better solutions along the value chain*. Obtenido de McKinsey & Company: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>
- MIDTRONICS. (2023). Obtenido de <https://www.midtronics.com/blog/types-of-li-ion-batteries-used-in-electric-vehicles/>
- Movil tronics. (2025). Obtenido de <https://moviltronics.com/tienda/bateria-48v-20ah-nmc/>
- MSG Equipment. (2023). *Which batteries is Tesla using in its models?* Obtenido de MSG Equipment.: <https://msg.equipment/en/blog/articles/which-batteries-is-tesla-using-in-its-models>
- Nissan. (2011). *On cell specifications and battery charging characteristics*. Obtenido de Nissan: <https://mynissanleaf.com/threads/on-cell-specifications-and-battery-charging-characteristics.3498/>
- ONU. (2021). *United Nations Climate Change*. Obtenido de El acuerdo de París: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- ONU. (2024). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Peters, B. Z. (2015). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review.
- Shradha, J. (2021). Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/hybrid-electric-vehicle-types-shradha-jadhav>
- Suarez, K. (2024). *Reciclaje de baterías de Ion-Li, una necesidad presente y futura*. Obtenido de Revista UNAM: https://revista.iim.unam.mx/index.php/materialesa_avanzados/article/view/36

- Umicore. (2023). *Umicore*. Obtenido de
<https://www.umicore.com/en/media/newsroom/umicore-battery-recycling/>
- US Department of Energy. (2024). Obtenido de Alternative Fuels Data Center:
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work>
- US Department of Energy. (2025). *Batteries for Electric Vehicles*. Obtenido de
<https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-batteries>
- US Department of energy. (2025). *How Do Hybrid Electric Cars Work?* Obtenido de US
 Department of energy: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work>
- US Department of Energy. (2025). *How Do Hybrid Electric Cars Work?* Obtenido de
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work>
- US Department of Energy. (2025). *How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Work?* Obtenido de
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work>
- Yang, D. (2021). *Reciclaje de baterías de litio para vehículos eléctricos*. Barcelona.
- YUSHUN XIN. (2024). Obtenido de
<https://www.youtube.com/@ewasterecyclingmachine/featured>

Índice de tablas

Tabla 1. Análisis causa- efecto relacionada al problema relacionado con la presencia de baterías ion litio automotrices en México.	13
Tabla 2. Matriz de marco lógico	14
Tabla 3. Comparativa de unidades eléctricas vendidas en México y el mundo.	16
Tabla 4. Estimación de existencias por tipo de vehículo al 2050.....	16
Tabla 5. Ventajas, desventajas y principales aplicaciones de los tipos de baterías de Ion Litio....	26
Tabla 6. Número de celdas por vehículo.....	28
Tabla 7.Costo promedio de la implementación de una planta chica a mediana.....	31

Tabla 8. Costo promedio operativo para el proceso de separación mecánica.....	31
Tabla 9. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso de separación mecánica.	32
Tabla 10. Costo promedio de la maquinaria para el proceso de pirometalúrgico.	34
Tabla 11. Variables consideradas en el costo operativo de una planta de proceso pirometalúrgico.....	35
Tabla 12. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso pirometalúrgico. ..	35
Tabla 13. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso hidrometalúrgico.	37
Tabla 14. Enfoques del proyecto.....	47
Tabla 15. Herramientas de investigación.....	48
Tabla 16. Cronograma del proyecto.....	50
Tabla 17. Situaciones de riesgo y estrategias de mitigación.....	50
Tabla 18. Clasificación de las herramientas de investigación y su relación con los objetivos del proyecto	52
Tabla 19. Ventas de autos con sistema eléctrico (Eléctricos, Híbridos e Híbridos conectables) del 2016 a 2024	54
Tabla 20. Unidades eléctricas totales vendidas del año 2016 al 2024	56
Tabla 21. Unidades eléctricas totales con baterías en etapa de descarte del año 2026 al 2034 ..	57
Tabla 22. Variación anual de ventas históricas del año 2016 al 2024.	59
Tabla 23. Proyección de ventas con el valor de variación de ventas históricas pesimista del 2025 al 2035.	59
Tabla 24. Tabla 23. Proyección de ventas con el valor de variación de ventas históricas optimista del 2025 al 2035.	60
Tabla 25. Conversión de existencias a celdas del año 2026 a 2045.....	62
Tabla 26. Descripción de características generales del proceso y maquinaria para el proceso de separación mecánica.....	64
Tabla 27. Volumen de kilogramos y toneladas en descarte para procesar en la planta de separación mecánica del año 2026 al 2045	67
Tabla 8. Costo promedio operativo para el proceso de separación mecánica.....	68

Tabla 9. Ganancias potenciales de los materiales obtenidos por el proceso de separación mecánica.	77
--	----

Índice de Figuras

Figura 1. Tendencia global de existencias de auto eléctricos	10
Figura 2. Demanda de litio en el 2030.	11
Figura 3. Ventas de autos eléctricos del año 2016 a 2023 en México.....	12
Figura 4. Electrificación, tendencias de tecnologías para el año 2050	19
Figura 5. Detalle de los ODS	20
Figura 6. Componentes de un auto eléctrico.....	22
Figura 7. Comparativa del funcionamiento de un hibrido eléctrico convencional y en serie.	24
Figura 8. Comparativa del funcionamiento de un hibrido eléctrico convencional y en serie.	25
Figura 9. Funcionamiento de una batería automotriz de Ion litio.....	26
Figura 10. Distribución de las celdas de un auto eléctrico.	27
Figura 11. Tipos de formas de las baterías de Ion Litio.....	28
Figura 12. Diagrama esquemático de la metodología propuesta.....	39
Figura 13. Diagrama esquemático de la metodología propuesta.....	40
Figura 14. Acotación de la población	41
Figura 15. Filtros aplicados para obtener las variables propuestas por la metodología.	54
Figura 16. Crecimiento de ventas del año 2016 a 2024 de vehículos con sistema eléctrico.....	55
Figura 17. Acotación de vehículos únicamente eléctricos	56
Figura 18. Existencias del año 2016 al 2035, históricas y proyectadas.....	61
Figura 19. Etapas del proceso de separación mecánica y sus materiales principales obtenidos..	65
Figura 20. Momentos requeridos de implementación o crecimiento de planta.....	69
Figura 21. Costos OPEX calculados.....	74
Figura 22. Costos toles	76
Figura 23. Kilogramos de material valiosos recuperados del año 2026-2045	78
Figura 24. Ganancias potenciales del año 2026-2045	78

Figura 25. Costo-beneficio escenario pesimista	79
Figura 26. Costo-beneficio escenario optimista.....	80
Figura 27. Análisis de viabilidad para escenario pesimista	81
Figura 28. Análisis de viabilidad para escenario optimista	82

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de número de celdas.	42
Ecuación 2. Ganancias potenciales	45
Ecuación 5. Cálculo de valores intermedios de CAPEX	68
Ecuación 6. Cálculo de CAPEX por crecimiento requerido de tamaño de planta	71
Ecuación 3. Cálculo de valores intermedios de OPEX	73
Ecuación 4. Cálculo OPEX/año	74

