
Modelo de Economía Circular para Baterías de Litio en Sistemas de Almacenamiento Energético: Un estudio de Viabilidad Técnica y Económica

Diana Isela Rivera Ramos

<https://orcid.org/0009-0003-9572-5505>

diana_industrial@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México, México

Mario Ibañez Olvera

<https://orcid.org/0000-0003-2828-5389>

mario_mecatronica@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México, México

Iván Lenin Cruz Jaramillo

<https://orcid.org/0000-0002-7832-1686>

ivan_cj@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México, México

Omar González Brito

<https://orcid.org/0000-0001-6536-0240>

omar_g@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México, México

Florice Noyola Mendoza

<https://orcid.org/0009-0005-8698-3662>

florice_nm@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México, México

RESUMEN

La economía circular ofrece una alternativa al modelo lineal al fomentar la reutilización y reciclaje de materiales. Este estudio propone un modelo para el reaprovechamiento de baterías de litio en su segunda vida útil, mediante un análisis documental de procesos de recuperación de litio, cobalto y níquel, incorporando diseño modular. Los resultados, obtenidos a partir de un análisis documental y comparativo de estudios previos, muestran una reducción estimada del 25 % en costos y una recuperación de hasta el 80 % de materiales, contribuyendo así a la sostenibilidad y a la transición energética.

Palabras clave: *economía circular, baterías de ion- litio, almacenamiento de energía, reciclaje de materiales*

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

El Editor y los Revisores declararon no tener conflicto de intereses.

Licencia: 

Circular Economy Model for Lithium Batteries in Energy Storage Systems: A Technical and Economic Feasibility Study

ABSTRACT

The circular economy offers an alternative to the linear model by promoting the reuse and recycling of materials. This study proposes a model for the repurposing of lithium batteries in their second life through a documentary analysis of recovery processes for lithium, cobalt, and nickel, incorporating a modular design. The results, derived from a documentary and comparative analysis of previous studies, indicate an estimated 25% reduction in costs and a recovery of up to 80% of materials, thereby contributing to sustainability and the energy transition.

Keywords: *circular economy, lithium-ion batteries, energy storage, materials recycling*

The authors declare no conflict of interest.

The Editor and the Reviewers declared no conflict of interest.

License:



INTRODUCCIÓN

La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende (Código Científico, 2024). Actualmente, la migración hacia la electromovilidad ha incrementado la adopción de baterías eléctricas como un elemento esencial en la fabricación de vehículos con bajas emisiones.

No obstante, dicha transición enfrenta desafíos relacionados como el alto costo de fabricación, la limitada disponibilidad geográfica de materiales críticos como litio, cobalto y níquel. Ante esta problemática, la implementación de un modelo de economía circular orientado a la optimización de los costos de producción adquiere especial relevancia.

La economía circular tiene un papel estratégico cuando se analiza el contexto de la política territorial del litio. La producción y refinación de este mineral se concentra principalmente en Australia, Chile, China y Argentina, lo que genera dependencia y vulnerabilidad para países importadores. Derivado de esta concentración, los modelos circulares —como la reutilización y el reciclaje de baterías— permiten reducir la presión sobre insumos primarios y mejorar la seguridad energética. Para nuestro país, donde la explotación del litio aún es limitada, la reutilización de baterías constituye una alternativa viable para recuperar materiales críticos, disminuir residuos y fortalecer la autonomía tecnológica en el marco de la transformación del sistema energético.

El modelo de economía circular permite reducir el uso de recursos vírgenes y minimizar la generación de residuos mediante estrategias enfocadas en el diseño sostenible, la recuperación eficiente de materiales, la reutilización de componentes funcionales y la adopción de estructuras modulares que faciliten el desmontaje y reciclaje al final de la vida útil de las baterías (Universitat Carlemany, 2020) (Alvarez, 2024).

Este planteamiento no solo busca incrementar la rentabilidad y competitividad de la industria, sino también fomentar la seguridad en el suministro de insumos estratégicos y reducir el impacto ambiental asociado con la fabricación y el desecho de baterías (Lazard, 2018).

Dentro del panorama global actual, de transición energética y cumplimiento de convenios internacionales sobre el cambio climático México ha firmado compromisos internacionales para cumplir con la Agenda 2030 de las Naciones Unidas y los Acuerdos de París sobre el cambio climático. Esto implica la promoción de proyectos de energía solar, eólica y geotérmica, así como la modernización de la infraestructura de generación energética (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2019).

En los últimos años, la generación distribuida ha mostrado un crecimiento significativo en México. De acuerdo con datos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE 2024), existen más de 500 mil contratos de interconexión de pequeña y mediana escala, sumando una capacidad instalada superior a 4.8 GW. Este incremento refleja una mayor adopción de sistemas fotovoltaicos residenciales y comerciales, lo que a su vez evidencia la necesidad de incorporar soluciones de almacenamiento capaces de gestionar la variabilidad de la producción renovable.

La reutilización de baterías de vehículos eléctricos en sistemas estacionarios se alinea con esta tendencia, al ofrecer alternativas de bajo costo y reducir la dependencia de tecnologías basadas en materiales críticos importados.

Este estudio propone y valida un modelo de economía circular aplicado a baterías de ion-litio, evaluando su viabilidad técnica y ambiental para su reutilización en sistemas de almacenamiento fijo.

En el contexto mexicano, la transición energética y el aprovechamiento de tecnologías basadas en energías renovables están regulados por la Ley de Transición Energética (LTE) y

por las disposiciones de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) sobre generación distribuida, actualizadas en 2023. Estas regulaciones establecen lineamientos para la interconexión de sistemas fotovoltaicos de hasta 500 kW y reconocen la necesidad de incorporar sistemas de almacenamiento que fortalezcan la estabilidad operativa de la red. Asimismo, el PRODESEN 2024–2038 identifica el almacenamiento energético como una medida prioritaria para incrementar la penetración de fuentes renovables en zonas con infraestructura limitada. Este marco regulatorio sustenta la pertinencia del modelo de segunda vida de baterías que se propone en este estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de este proyecto se estructurará en fases, cada una enfocada en la aplicación del modelo de economía circular en la producción, reutilización y reciclaje de baterías para vehículos eléctricos.

Diseño sostenible

En la fase de diseño sostenible, se plantea un enfoque modular que facilite el mantenimiento, reparación y reciclaje. Para evaluar su efectividad, se llevaron a cabo simulaciones preliminares mediante software de modelado computacional, las cuales constituyen avances iniciales que servirán de referencia para etapas posteriores.

De igual forma, se contempla el análisis del uso de materiales renovables y reciclados, la evaluación de la viabilidad de componentes alternativos y la extensión de la vida útil de baterías mediante simulaciones termoeléctricas en ANSYS.

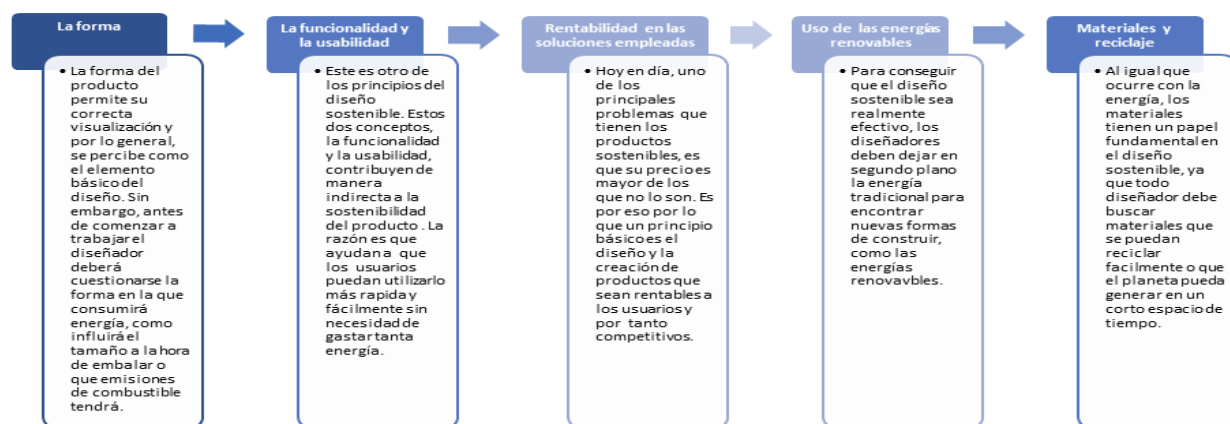
Estos avances permiten proyectar protocolos de reacondicionamiento y estrategias para su integración en aplicaciones secundarias, que se validarán en fases posteriores.

En la fase de diseño sostenible, es fundamental considerar los principios que orientan la creación de productos con menor impacto ambiental y mayor eficiencia funcional.

Estos principios guían la propuesta de diseño modular del presente estudio, al priorizar la

forma, la funcionalidad, la rentabilidad, el uso de energías renovables y el reciclaje de materiales. En la figura 1 se resumen los principales lineamientos del diseño sostenible que sustentan la metodología propuesta y su aplicación en el desarrollo de sistemas de almacenamiento basados en baterías reutilizadas.

Figura 1. Los principios del diseño sostenible.



Fuente: elaboración propia

El enfoque de diseño adoptado prioriza materiales resistentes y ligeros para optimizar la eficiencia del sistema, mientras que una visión holística del diseño impulsa el desarrollo de capacidades que reemplazan soluciones tradicionales.

Diversas estrategias de diseño sostenible han demostrado que es posible mantener la funcionalidad y calidad de los productos mediante el uso de materiales alternativos con menor impacto ambiental. Estos enfoques privilegian la elección de materiales reciclables o reutilizables, sin comprometer el desempeño estructural ni la seguridad del producto terminado.

Para evaluar la efectividad del diseño, se realizaron simulaciones estructurales y térmicas mediante software de modelado computacional, asegurando que las baterías sean funcionales, seguras y sostenibles. Se contempla la optimización estructural como alternativa para mejorar la geometría, materiales y distribución interna de los componentes de la batería

(soportes, carcasas, canales térmicos, fijación etc.) para que las baterías soporten mejor los esfuerzos mecánicos, térmicos y eléctricos.

El objetivo es obtener:

- Peso mínimo
- Máxima rigidez
- Resistencia a la inestabilidad

Respetando límites de tensión, restricciones de desplazamiento y las limitaciones geométricas. Se evalúa la aplicabilidad de materiales reciclados y biodegradables, así como la viabilidad de reemplazar elementos contaminantes por alternativas más ecológicas. La evaluación y la mejora son partes imprescindibles de cualquier proceso de diseño. Sin embargo, tienen aún más importancia para evaluar las iniciativas sostenibles y mejorarlas lo suficiente como para lograr la misma, o mejor calidad, que tienen los productos ya existentes. (Universitat Carlemany, 2020)

Uso de recursos renovables

La economía circular ha emergido como un modelo de gestión de recursos que busca mitigar la creciente presión sobre los recursos no renovables mediante la optimización de los ciclos de vida de los productos y materiales. Uno de los impactos más relevantes de este enfoque es la disminución en la extracción de materias primas vírgenes.

A través de la reutilización de materiales, se promueve una reducción significativa en la necesidad de extraer recursos naturales, lo cual contribuye a la conservación de los ecosistemas y a la reducción de los impactos ambientales asociados a la minería y otras formas de extracción intensiva. (Alvarez, 2024)

El uso de materias primas renovables es una estrategia clave en la transición hacia un modelo de producción más sostenible.

En esta fase, se llevará a cabo un análisis de los materiales utilizados en la fabricación de baterías, identificando aquellos que pueden ser reemplazados por alternativas renovables sin comprometer la eficiencia ni la seguridad del producto.

Para ello, se realizó una investigación sobre los avances en el uso de materiales biodegradables y reciclados en la industria de almacenamiento de energía. Se considerará la implementación de compuestos avanzados que reduzcan la dependencia de elementos finitos como el cobalto y el litio, explorando otras opciones, que permitan ofrecer una mayor estabilidad y durabilidad. Los estudios de ciclo de vida (LCA) se emplearán para comparar el impacto ambiental de los materiales tradicionales frente a sus equivalentes sostenibles. También se llevarán a cabo una simulación para evaluar la resistencia y eficiencia energética de estos materiales en distintas condiciones operativas. Esta fase permitirá proponer estrategias para la transición hacia una producción de baterías más limpia y responsable, sentando las bases para una industria menos dependiente de recursos limitados y con menor impacto ambiental.

Algunas formas en que se puede implementar

Energía renovable en la fabricación

Alimentar las líneas de producción con fuentes como la energía solar o eólica, disminuyendo así las emisiones de CO₂ asociadas con la fabricación de baterías.

Instalar paneles solares o turbinas eólicas en las instalaciones de la planta, o contratar proveedores de energía renovable a través de contratos de compra de energía (PPA).

Materiales con menor impacto ambiental.

Preferir componentes o insumos producidos a partir de procesos más limpios o que utilicen energías renovables, para reducir el impacto de la cadena de suministro. Investigar la viabilidad de materiales orgánicos o de base biológica (por ejemplo, ciertos polímeros de origen vegetal) en carcasas y componentes secundarios de la batería, siempre que cumplan

con los criterios de seguridad y rendimiento.

Optimización de la cadena de suministro

Emplear metodologías de trazabilidad para asegurar que los minerales críticos (litio, cobalto, níquel) provengan de operaciones que reduzcan su huella de carbono, ya sea mediante la adopción de energías renovables o prácticas mineras responsables.

Diseñar rutas logísticas más cortas o eficientes para disminuir el consumo de combustible en el transporte de materias primas y productos terminados.

Extensión de la vida útil del producto

En la economía circular uno de los principios fundamentales es la prolongación del ciclo de vida de los productos. En esta etapa, se explorará la posibilidad de reutilizar baterías de vehículos eléctricos en aplicaciones estacionarias de almacenamiento de energía. Se llevará a cabo un proceso de evaluación y clasificación de baterías usadas, determinando su nivel de degradación y su viabilidad para ser empleadas en sistemas de almacenamiento para redes eléctricas, instalaciones industriales o aplicaciones residenciales. Para validar esta propuesta, se desarrollarán una propuesta de modelo de simulación, que permitirán analizar el comportamiento térmico y eléctrico de las baterías en distintas condiciones de carga y descarga. También se realizarán estudios comparativos entre el desempeño de baterías nuevas y aquellas reutilizadas, evaluando su eficiencia, seguridad y rentabilidad. Con base en estos resultados, se definirán protocolos para su reacondicionamiento y adaptación a nuevas aplicaciones, asegurando su máximo aprovechamiento antes de su disposición final. (García Bernal, 2020)

Estimación de vida útil residual (State of Health)

La vida útil residual de cada celda se estimó mediante el cálculo del State of Health (SOH), definido como la relación entre la capacidad actual y la capacidad nominal. El SOH se obtuvo a partir de curvas de capacidad vs. número de ciclos, ajustadas mediante un modelo

exponencial de degradación. Se empleó la ecuación:

$$SOH = \left(\text{Capacidad} \frac{\text{actual}}{\text{Capacidad nominal}} \right) * 100$$

Las celdas con SOH superior al 70 % se consideraron aptas para aplicaciones estacionarias. Complementariamente, se evaluó la degradación térmica mediante el análisis de incremento de temperatura durante descarga continua a 1C; un aumento mayor a 12 °C respecto a la línea base se clasificó como degradación acelerada.

Esta metodología permite estimar con precisión la vida útil remanente de cada módulo para su integración en sistemas de almacenamiento.

Evaluación y diagnóstico del estado de la batería

Realizar pruebas de rendimiento (capacidad, potencia, resistencia interna) para determinar el estado de cada celda o módulo. Para comenzar, se utilizará la herramienta de simulación ANSYS para el modelado termoeléctrico de una batería de litio bajo el enfoque SISO (Single Input, Single Output).

Este modelo nos permite analizar la respuesta térmica y eléctrica de la batería considerando una entrada (por ejemplo, corriente) y una salida (como el voltaje o temperatura), lo cual simplifica el análisis dinámico del sistema. En ANSYS se definió la geometría completa del sistema y se generó un mallado poliédrico de aproximadamente 105,000 celdas, suficiente para representar con precisión el comportamiento térmico y de flujo. Este tipo de celdas se seleccionó por su estabilidad numérica y porque evita distorsiones comunes en otros mallados.

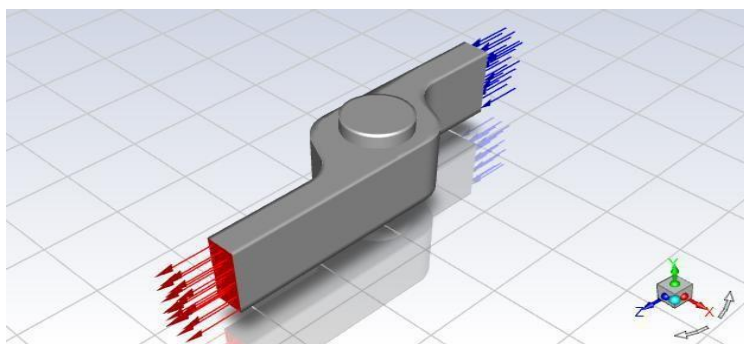
Para asegurar la calidad, primero se revisó visualmente la malla y su escala, verificando que no hubiera zonas deformadas o volúmenes desconectados. Además, se aplicaron criterios basados en la integridad del mallado y en el comportamiento de los residuos: cuando una región mostraba baja ortogonalidad o tendencia a generar oscilaciones, se ajustaba mediante suavizado o refinamiento local. Las celdas que comprometían la convergencia fueron

descartadas y regeneradas. Con estas acciones se garantizó que el modelo trabajara únicamente con elementos de buena calidad, reduciendo errores numéricos y fortaleciendo la confiabilidad de los resultados.

Para visualizar la configuración geométrica empleada en la simulación, en la figura 2 se presenta el modelo CAD desarrollado bajo el enfoque SISO. Esta representación permite identificar las zonas de entrada y salida de flujo térmico utilizadas en ANSYS, así como los puntos de aplicación de las condiciones de frontera.

Dicho modelo constituye la base para el análisis numérico del comportamiento termoeléctrico de la batería de litio, al permitir correlacionar la respuesta térmica con los parámetros eléctricos simulados.

Figura 2. CAD de la batería SISO



Fuente: tomado de (Faustino, 2025)

Validación del modelo: evaluación experimental de celdas

Como parte complementaria del modelo SISO, se propone realizar una validación experimental del estado de las baterías utilizadas en la simulación. Para ello, se aplica un protocolo técnico que permite evaluar el estado de cada celda o módulo a través de:

- Inspección visual de daños físicos y fugas.
- Medición de voltaje individual, para detectar celdas con caída de tensión crítica.
- Pruebas de capacidad, comparando la energía entregada con la nominal.
- Cálculo de resistencia interna, evaluando el aumento de impedancia.

- Análisis térmico, que permite detectar anomalías por calentamiento excesivo durante la carga/descarga.

Para asegurar la calidad del modelo, se aplicaron criterios de selección y descarte de celdas basados en la verificación directa del mallado y en su impacto durante la solución numérica. Primero se revisó visualmente la malla y su escala para detectar deformaciones, desconexiones o regiones mal definidas.

Después, durante la ejecución del caso, se monitoreó el comportamiento de los residuos y el balance de masa, ya que una malla “short of ideal” suele reflejarse en inestabilidad o falta de convergencia. Cuando se identificaron celdas con geometría irregular o que generaban oscilaciones persistentes en los residuos, se aplicaron ajustes mediante suavizado o regeneración local.

Las celdas que continuaban afectando la estabilidad fueron descartadas, conservando únicamente aquellas con la calidad suficiente para garantizar una solución coherente y confiable.

Gracias a estos procedimientos es posible clasificar las baterías en tres grupos: aquellas que aún pueden reutilizarse, las que requieren algún tipo de reacondicionamiento y las que definitivamente deben ser desechadas.

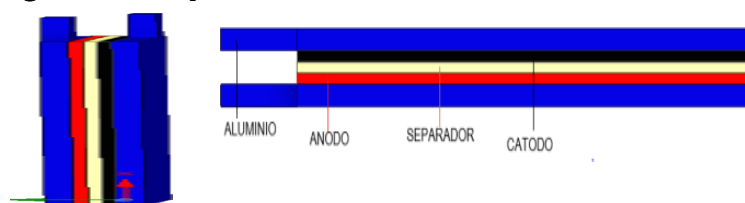
Esta clasificación resulta fundamental para poder seleccionar con mayor certeza las celdas que se integrarán al modelo, buscando aprovechar al máximo su vida útil dentro de sistemas de almacenamiento estacionario.

Reacondicionamiento y reparación de módulos

En la figura 3 se presenta el modelo esquemático de una celda de ion-litio. Este diagrama ilustra la disposición de los componentes principales —ánodo, cátodo, separador y colectores de corriente— cuya integridad influye directamente en el rendimiento electroquímico del sistema.

La representación permite identificar las zonas críticas susceptibles de degradación y sirve como referencia para los procesos de reacondicionamiento y reparación de módulos.

Figura. 3. Componentes de la celda de una batería de litio.



Fuente: Tomado de (Faustino, 2025)

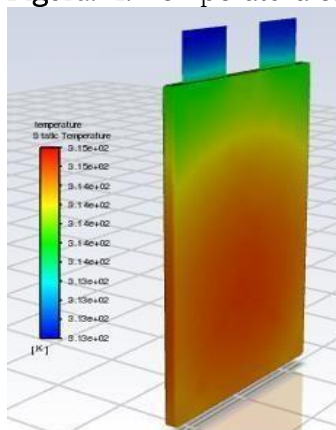
Una vez identificadas las celdas o módulos que presentan un desempeño inferior al esperado, el paquete de baterías es desmontado siguiendo procedimientos controlados, con el objetivo de retirar exclusivamente aquellas unidades que se encuentran dañadas o degradadas.

Este proceso debe hacerse con herramientas adecuadas y tomando todas las precauciones necesarias, ya que se manipulan componentes que pueden representar un riesgo eléctrico o químico si no se manejan correctamente.

Después, se sustituyen las celdas defectuosas por otras que tengan características similares, ya sea que provengan de otro lote reciclado o sean nuevas, cuidando siempre que sean compatibles y que el módulo quede bien balanceado eléctricamente.

Con el fin de analizar el comportamiento térmico posterior al proceso de reacondicionamiento, en la figura 4 se presenta la distribución de temperatura estática obtenida en una celda de ion-litio. Esta simulación permite observar las variaciones térmicas generadas durante la operación, lo cual resulta fundamental para validar la estabilidad del sistema y prevenir concentraciones de calor que afecten la seguridad o el desempeño del módulo reacondicionado.

Figura. 4. Temperatura estática de una celda.



Fuente: tomado de (Faustino, 2025)

Una vez reacondicionado, se le aplican pruebas para asegurarse de que realmente funciona bien: ciclos de carga y descarga, monitoreo de temperatura y revisión de la estructura física. Si todo está en orden, el módulo puede volver a utilizarse, especialmente en sistemas de almacenamiento estacionario.

Reutilización en aplicaciones secundarias

Definir usos alternativos para las baterías que ya no cumplan los requisitos de un vehículo eléctrico, como almacenamiento estacionario de energía en hogares o instalaciones comerciales.

Cuando una batería ya no es lo suficientemente eficiente para seguir funcionando en un vehículo eléctrico, no significa que haya llegado al final de su vida útil.

Todavía puede ser muy útil en otros contextos donde no se requiere tanta potencia, como en casas, pequeños negocios o incluso en comunidades que no tienen acceso constante a la red eléctrica.

Beneficios de la reutilización:

- Reduce los residuos electrónicos.
- Disminuye la extracción de litio y otros materiales.

Primero se eligen aquellas que todavía conservan buena parte de su capacidad y que no

representan un riesgo. Luego, se reacondicionan y se agrupan en bancos modulares que se conectan a sistemas solares o híbridos.

Para garantizar su funcionamiento seguro, se incorpora un sistema de gestión de baterías (BMS) que ayuda a monitorear su estado y a evitar sobrecargas o fallas.

El reaprovechamiento de baterías de ion-litio en sistemas de almacenamiento estacionario permite disminuir la generación de residuos y prolongar su ciclo de vida, al mismo tiempo que ofrece una alternativa económicamente viable para facilitar el acceso a tecnologías de almacenamiento energético. Esta estrategia se alinea con los principios de la economía circular, al optimizar la eficiencia en el uso de recursos y fomentar el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles.

Recopilación de datos y retroalimentación al diseño

Ajustar las estimaciones de costo y beneficios obtenidos, contribuyendo a la toma de decisiones en fases anteriores y posteriores del proyecto.

Estas actividades, orientadas a aprovechar al máximo cada batería antes de su disposición final, promueven la reducción de costos y la disminución de residuos, al tiempo que extienden la funcionalidad de las baterías para vehículos eléctricos en distintos entornos. Una vez que las baterías reacondicionadas se ponen en operación dentro de un sistema de almacenamiento, es fundamental monitorear su comportamiento.

A través del sistema de gestión de baterías (BMS) o mediante registros manuales, se recopilan datos relacionados con el rendimiento de las baterías, tales como:

- El número de ciclos de operación.
- El comportamiento durante los procesos de carga y descarga.
- La generación de calor y la ocurrencia de posibles fallas.

Esta información permite comparar los parámetros estimados en la etapa de diseño con el desempeño observado en condiciones reales de operación. En caso de identificarse

desviaciones en el rendimiento o fallas recurrentes en determinados componentes, se realizan ajustes al diseño original, que pueden incluir la modificación de materiales, el balanceo de módulos o el rediseño de la integración de las celdas.

Este proceso de retroalimentación contribuye a la mejora continua del diseño del sistema de almacenamiento, permitiendo:

- Disminuir los costos operativos.
- Incrementar la vida útil de las baterías.

Al mismo tiempo, fortalece el enfoque de economía circular al incorporar la experiencia operativa como un insumo clave para mejorar el desempeño del sistema durante todo su ciclo de vida.

Recuperación de materiales

Cuando las baterías alcanzan el final de su ciclo de vida útil y no pueden ser reutilizadas en otras aplicaciones, es fundamental implementar un proceso eficiente de recuperación y reciclaje de materiales críticos. Esta fase se enfocará en diseñar un sistema de desensamble, clasificación y recuperación de componentes valiosos como litio, cobalto, níquel y aluminio.

Para ello, se llevará a cabo un análisis detallado del proceso de reciclaje existente en la industria, identificando áreas de mejora y oportunidades para incrementar la eficiencia en la recuperación de materiales. Se diseñará un protocolo de desensamble estructurado, que optimice la separación de componentes y minimice la generación de residuos no reciclables.

RESULTADOS

Con el propósito de enfrentar los altos costos de producción, la dependencia actual de materiales críticos y el bajo aprovechamiento de recursos en la industria de baterías de ion-litio, se desarrolló un modelo de economía circular para sistemas de almacenamiento energético estacionario, el cual integra tres fases: diseño sostenible, validación experimental y evaluación termoeléctrica mediante simulación computacional. En la fase experimental se

analizaron celdas recicladas mediante inspección visual, pruebas de capacidad y mediciones de resistencia interna, lo que permitió determinar su grado de degradación y clasificarlas para su reacondicionamiento y uso posterior en el modelo de simulación.

Con el propósito de enfrentar los altos costos de producción, la dependencia de materiales críticos y el bajo aprovechamiento de recursos en la industria de baterías de ion-litio, se desarrolló un modelo de economía circular para sistemas de almacenamiento energético estacionario, el cual integra tres fases:

- Diseño sostenible.
- Validación experimental.
- Evaluación termoeléctrica mediante simulación computacional.

La fase de diseño sostenible permitió definir una configuración modular orientada a la reducción del uso de materiales y a la optimización de la geometría del sistema. La segunda fase, validación experimental consistió en evaluar el estado funcional de celdas recicladas a través de inspección visual, pruebas de capacidad y mediciones de resistencia interna, con el fin de identificar su grado de degradación y clasificarlas para su reacondicionamiento. Finalmente, en la tercera fase, la evaluación termoeléctrica mediante simulación computacional permitió analizar el comportamiento térmico del sistema bajo distintas condiciones de operación, aportando criterios para mejorar la seguridad y el desempeño del diseño propuesto.

En la Tabla 1 se presentan los principales parámetros térmicos y eléctricos obtenidos a partir de la simulación, los cuales permiten caracterizar el comportamiento del módulo durante el proceso de propagación térmica.

Tabla 1. Parámetros térmicos y eléctricos utilizados en la simulación

Tipo de parámetro	Parámetro	Valor simulado	Descripción breve
<i>Térmico</i>	Temperatura inicial	300 K ($\approx 27\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Condición térmica uniforme al inicio.
<i>Térmico</i>	Rango térmico	300–450 K (27–177 $^{\circ}\text{C}$)	Intervalo observado en los contornos térmicos durante la propagación.
<i>Térmico</i>	Tiempo de propagación	$\sim 60\text{ s}$	Tiempo estimado para que el calor se distribuya en el módulo.
<i>Eléctrico</i>	Voltaje nominal de la celda	4 V	Voltaje de referencia para el modelo energético.
<i>Eléctrico</i>	Capacidad nominal de la celda	90 Ah	Capacidad eléctrica empleada en el modelo.
<i>Eléctrico</i>	Corriente aplicada	100 A	Corriente utilizada para estimar el calentamiento por efecto Joule.
<i>Eléctrico</i>	Energía eléctrica convertida en calor	1.11×10^9	Energía asociada al corto interno y generación de calor.

Fuente: elaboración propia

A partir de los valores presentados en la Tabla 1, se observa que el módulo inicia en una condición térmica uniforme y alcanza temperaturas elevadas en un intervalo cercano a 60 s. Los parámetros eléctricos considerados incluyen un voltaje nominal de 4 V, una capacidad de 90 Ah y una corriente aplicada de 100 A, utilizados para evaluar el calentamiento por efecto Joule y la generación de calor asociada al corto interno. Durante la etapa de simulación, el comportamiento térmico y eléctrico de la celda se modeló en ANSYS bajo un esquema SISO, con una corriente constante de 100 A y una temperatura inicial de 27 $^{\circ}\text{C}$, aplicando condiciones de frontera representativas del entorno de operación. Los resultados mostraron una distribución térmica estable entre 25 $^{\circ}\text{C}$ y 38 $^{\circ}\text{C}$, así como la presencia de zonas con mayor acumulación de calor en la región central de la celda.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que, los hallazgos térmicos revelan que el módulo reacondicionado mantiene un comportamiento térmico estable, lo que sugiere que las celdas

recicladas preservan una integridad funcional para el almacenamiento energético estacionario. Este resultado es consistente con lo expuesto previamente, donde se observa que alzas térmicas moderadas no afectan el rendimiento del sistema si se aplican métodos de gestión eficaces.

Por otro lado, los parámetros eléctricos muestran una relación directa entre la corriente aplicada, la energía transformada en calor y el incremento de temperatura, en concordancia con lo reportado para baterías de ion-litio sometidas a sobrecalentamiento. La identificación de zonas con mayor acumulación de calor aporta información útil para el rediseño geométrico del módulo y la mejora del sistema de enfriamiento.

Desde la perspectiva de la economía circular, el modelo permitió estimar una recuperación cercana al 80 % de materiales reutilizables, gracias a la exhaustiva clasificación funcional de las celdas y la asignación prioritaria de componentes con potencial de segunda vida. Además, se identificó una reducción aproximada del 25 % en los costos de producción, un resultado atribuible a la disminución en el uso de materiales vírgenes y a la eficiente optimización del diseño modular del sistema.

En conjunto, estos resultados respaldan la viabilidad técnica y económica del modelo propuesto y confirman el potencial de las celdas recicladas para su aplicación en sistemas de almacenamiento energético destinados al alumbrado público y al suministro eléctrico en escuelas ubicadas en zonas de difícil acceso, donde se requieren soluciones energéticas confiables, de bajo costo y con impacto social positivo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este proyecto, a partir de simulaciones y análisis preliminares, sugieren que la aplicación de los principios del modelo de economía circular aplicados en la gestión de baterías de litio representa una alternativa viable para hacer frente a los retos actuales como son, el agotamiento de recursos, el incremento de residuos electrónicos y los

elevados costos de producción. Este proyecto establece una estrategia técnica que integra simulación multifísica, validación experimental y evaluación ambiental. Este enfoque permite vincular la investigación con procesos de reacondicionamiento y manufactura, para el desarrollo de baterías más sostenibles y eficientes.

Uno de los aspectos prometedores del modelo es su flexibilidad, ya que podría adaptarse según las condiciones, necesidades y los recursos disponibles del entorno. No obstante, también se identifican barreras relevantes que deberán considerarse en futuras fases, tales como la falta de normativas claras sobre el uso de baterías reacondicionadas, el marcado escepticismo del mercado ante productos reutilizados y la necesidad de fortalecer la capacitación técnica de los equipos encargados del reacondicionamiento.

Si bien se han logrado avances significativos mediante simulaciones y propuestas técnicas, será necesario profundizar en la validación experimental en condiciones reales, a fin de comprobar la funcionalidad del modelo y optimizar los resultados obtenidos.

Agradecimiento

Agradezco al Tecnológico Nacional de México por brindar el respaldo institucional y académico necesario para el desarrollo de este proyecto, así como por su compromiso con la investigación, la innovación y la sostenibilidad en beneficio de la sociedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, J. (2024). *Pemex y el plan de México hacia un nuevo futuro: Almacenamiento de energía bajo el modelo de pilas de hidrógeno.*

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2019). *Electromovilidad: Experiencias comparadas.*

https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27343/1/BCN_Electromovilidad_Experiencias_comparadas_.pdf



Brown, L. R. (s. f.). *La gran transición: De los combustibles fósiles hacia las energías solar y eólica*. Earth Policy Institute.

<https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

Código Científico. (2024, septiembre 30). *Modelo de economía circular y recursos energéticos*. Revista Código Científico.

<https://revistacodigocientifico.itslosandes.net/index.php/1/article/view/491/1022>

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2020). *Alumbrado público, una demanda social con alto potencial de ahorro de energía*. Gobierno de México.

<https://www.gob.mx/conuee/articulos/alumbrado-publico-una-demanda-social-con-alto-potencial-de-ahorro-de-energia>

E-mov (2020, enero 14). *Electromovilidad: El transporte sustentable que el mundo necesita ahora*.

<https://web.e-mov.cl/2020/01/14/electromovilidad-el-transporte-sustentable-que-el-mundo-necesita-ahora>

Faustino, T. M. (2025). *Diseño y simulación de una batería de litio para la electromovilidad* (Tesis de licenciatura). Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco.

Fariza, I. (2024, agosto 17). *La bombilla del siglo XXI: La revolución de las baterías alumbrará una nueva era*. El País.

<https://elpais.com/economia/negocios/2024-08-17/la-bombilla-del-siglo-xxi-la-revolucion-de-las-baterias-alumbra-una-nueva-era.html>

García Bernal, M. (2020). *Aplicaciones de energía cinética en electromovilidad autónoma y sostenible*. Redalyc.

<https://www.redalyc.org/journal/5537/553768213016/html/>



- Gomes, J. A. (2021). *Optimization strategies for battery life extension in renewable energy systems*. *Energy Reports*.
<https://www.sciencedirect.com/journal/energy-reports>
- Goodenough, W. (2019). Lithium-ion battery development takes Nobel. *Science*, 366(6463), 292. <https://doi.org/10.1126/science.366.6463.292>
- Lazard. (2018). *Física universitaria* (Vol. 2). OpenStax.
<https://openstax.org/details/books/fisica-universitaria-volumen-2>
- Mathur, M. F. (2015). *Energy storage systems: Applications and technology*.
- Pasatealoelectrico.es. (2024, enero 23). *¿Qué es la segunda vida de las baterías de vehículos eléctricos?*
<https://pasatealoelectrico.es/2024/01/23/segunda-vida-baterias-vehiculos-electricos/>
- Ronyver. (2019). *Sistemas de gestión de baterías (BMS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS)*. Redalyc.
<https://www.redalyc.org/pdf/2570/257059819006.pdf>
- Secretaría de Energía. (2024). *Estrategia Nacional de Energía 2024–2030*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/sener>
- Universitat Carlemany. (2020, noviembre 24). *Los principios del diseño sostenible*.
<https://www.universitatcarlemany.com/actualidad/blog/los-principios-del-diseno-sostenible/>
- Zhao, Y. W. (2021). *Sistemas de gestión de baterías y optimización energética en aplicaciones de vehículos eléctricos*.

La Revista utiliza códigos para identificar al Editor y al equipo de PARES REVISORES. si tiene dudas o consultas contacte a:
contacto@cienciayreflexion.org
Código de Editor: 105
Código de Revisores: 753

