

.INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Opciones de manejo para las baterías de ion-litio de vehículos eléctricos en Costa
Rica”**

Jennifer María Navarro Naranjo

CARTAGO, Julio, 2022

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 3.0 No portada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

“Opciones de manejo para las baterías de ion-litio de vehículos eléctricos en Costa Rica”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

M.Sc. Laura Hernández Alpízar
Director

Dr. Roberto Urcuyo Solórzano
Lector 1

MAIE. Luis Guillermo Valerio Pérez
Lector 2

Dra.ir. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinador COTRAFIG

MSc. Ricardo Coy Herrera
Directora Escuela de Química

M.Sc. Diana Zambrano Piamba
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi mamá por ser mi apoyo incondicional y motivarme continuamente a ser mejor ser humano.

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a mi mamá por todo el tiempo, amor y apoyo que me ha brindado, por impulsarme a buscar el camino para cumplir mis metas. A mi papá y a mis hermanos por acompañarme durante esta etapa. A novio, Allan González por el apoyo, amor y paciencia, por motivarme a continuar y no rendirme. A Juan José Pineda, por escucharme y motivarme a seguir mis sueños.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	17
2.	OBJETIVOS.....	19
2.1.	Objetivo general	19
2.2.	Objetivos específicos.....	19
3.	REVISIÓN DE LITERATURA	20
3.1.	Baterías de ion-litio en vehículos eléctricos.....	20
3.1.1.	Funcionamiento	22
3.1.2.	Vida útil	23
3.2.	Vehículos eléctricos en Costa Rica	24
3.2.1.	Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030.....	25
3.2.2.	Decreto N°9518 Ley Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico	26
3.3.	Gestión integral de las baterías de ion-litio.....	27
3.3.1.	Reúso	30
3.3.2.	Reciclaje	31
3.3.3.	Consideraciones para el manejo de LIBs de VE	33
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	37
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
5.1.	Escenario de Vehículos Eléctricos en Costa Rica.....	40
5.2.	Alcance del PNTE para el manejo de residuos de baterías de vehículos eléctricos.....	48
5.3.	Gestión de las baterías de ion-litio	50
5.4.	Reúso.....	56
5.5.	Reciclaje	64
6.	PROPUESTA	68
6.1.	Diagnóstico.....	69

6.2.	Almacenamiento.....	71
6.3.	Remodelado y remanufactura.....	71
6.4.	Reúso.....	73
6.5.	Reciclaje.....	75
6.6.	Actores y responsabilidades.....	78
6.7.	Alternativa: exportación.....	81
7.	CONCLUSIONES.....	82
8.	RECOMENDACIONES.....	85
9.	REFERENCIAS.....	86
	APÉNDICES.....	92
	Apéndice 1. Perfil de las personas entrevistadas.....	92
	Apéndice 2. Guía para entrevistas.....	95
	Apéndice 3. Preguntas de la encuesta a usuarios.....	101
	Apéndice 4. Estimado de vida de la batería por distancia recorrida.....	106
	ANEXOS.....	107
	Anexo 1. Característica de los VE que circulan en el país.....	107
	Anexo 2. Características de algunos de los VE disponibles en Costa Rica.....	109
	Anexo 3. Especificaciones de celdas de litio por geometría.....	111

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 Composición de los diferentes tipos de baterías ion-litio.....	21
TABLA 2 Pruebas para diagnóstico del estado de salud de la batería según USABC	29
TABLA 3 Nivel de capacitación del personal	35
TABLA 4 Condiciones de almacenamiento de las LIBs.....	36
TABLA 5 Sectores identificados y método de recolección de información	37
TABLA 6 Estimación de importaciones de baterías para Costa Rica por código arancelario 2017-2027.....	44
TABLA 7 Estimación de generación de LIBs para Costa Rica por código arancelario para el periodo 2022-2027.....	51
TABLA 8 Regulaciones para LIBs de VE en el contexto internacional	56
TABLA 9 Costo de reensamblaje estimado por batería, para vehículos eléctricos.....	57
TABLA 10 Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 200 km.....	61
TABLA 11 Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 300 km.....	62
TABLA 12 Comparación entre celdas de igual composición y diferente geometría	63
TABLA 13 Promedio de tarifa residencial e industrial horaria 2022.....	74
TABLA 14 Propuesta para la gestión integral de las LIBs de los VE.....	78
TABLA 15 Perfil de las personas entrevistadas por sector	92
TABLA 16 Encuesta realizada a usuarios de VE en Costa Rica.....	101

TABLA 17 Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 100 km.....	106
TABLA 18 Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 400 km.....	106
TABLA 19 Características de VE colectivos disponibles en Costa Rica.....	107
TABLA 20 Características de VE individuales (bicicletas y scooters) disponibles en Costa Rica.....	109
TABLA 21 Especificaciones de algunas celdas prismáticas disponibles en el mercado ...	111
TABLA 22 Especificaciones de algunas celdas cilíndricas disponibles en el mercado	113
TABLA 23 Especificaciones de algunas celdas tipo bolsa disponibles en el mercado	115

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Conformación de la batería a) celda, b) módulo, c) batería. [4]	20
Fig. 2. Geometría de las celdas de litio a) bolsa, b) cilíndrica, c) prismática. [4]	21
Fig. 3. Esquema de la dinámica de carga-descarga para cada ciclo de operación en una celda. [7].....	22
Fig. 4. Vehículos eléctricos en Costa Rica del 2010 al 2022. Basado en [2].	24
Fig. 5. Economía circular para el ciclo de vida de las LIBs. [18]	27
Fig. 6. Logística de rutas para la disposición de una batería de vehículo eléctrico. [8]	28
Fig. 7. Esquema general del proceso de reciclaje de las baterías de ion-litio agotadas. [20]	32
Fig. 8. Equipo requerido para el área de trabajo con las LIBs. [27].....	34
Fig. 9. Vehículos eléctricos identificados en Costa Rica	40
Fig. 10. Distribución de los valores de potencia (W) de los VE individuales disponibles en el país. [29]	41
Fig. 11. Tendencia de importación de LIBs en el sector transporte para el periodo 2017-2030. Adaptada de [30].	42
Fig. 12. Distribución de los usuarios de VE según la encuesta aplicada.....	45
Fig. 13. Perfil académico de los usuarios de VE en Costa Rica.....	46
Fig. 14. Aspectos que influyen en la compra de un VE	47
Fig. 15. Programas sobre manejo de residuos de baterías y otros repuestos asociados directamente a los VE del PNTE de acuerdo con el sector gobierno entrevistado	49

Fig. 16. Estimación de generación de residuos de LIBs en Costa Rica periodo 2022-2030. [30].....	50
Fig. 17. Gestores de residuos en Costa Rica.....	54
Fig. 18. Gestores de baterías autorizados para cada etapa del proceso de gestión los residuos de las pilas-baterías de ion-litio.	55
Fig. 19. Posibilidades de reúso de acuerdo con las personas entrevistadas.....	58
Fig. 20. Clasificación de las actividades de reúso	59
Fig. 21. Posibilidades de mercado para reúso de LIBs según los actores entrevistados	59
Fig. 22. Posibilidad de desarrollo de reciclaje en Costa Rica según los expertos académicos y del sector gobierno entrevistados	64
Fig. 23. Aspectos para considerar según los expertos académicos y del sector gobierno entrevistados en torno al proceso de reciclaje de LIBs en Costa Rica	65
Fig. 24. Proyección de generación de LIBs asociadas al sector movilidad en Centroamérica para el periodo 2022-2027. Basado en [30].....	66
Fig. 25. Comparación de la proyección de generación de LIBs asociadas al sector movilidad en Costa Rica y Centroamérica para el periodo 2022-2027. [30]	67
Fig. 26. Etapas del procesamiento de las LIBs.....	68
Fig. 27. Precio de algunos metales y combustibles para el periodo 2000-2022 [40]	77

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

BMS	Sistema de Gestión de la Batería (Battery Management System)
FDV	Fin de vida
GAM	Gran Área Metropolitana
HS	Sistema Armonizado (Harmonized System)
IEEE	Institute of Electrical Engineers
INCOFER	Instituto Costarricense de Ferrocarriles
INTECO	Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
LIBs	Baterías de ion-litio
MEP	Ministerio de Educación Pública
MINAE	Ministerio Nacional de Ambiente y Energía
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización No Gubernamental
ONU	La Organización de las Naciones Unidas
PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2021-2030)
PND	Plan Nacional de Descarbonización (2018-2050)
PLE	Plan Nacional de Energía
PNTE	Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030
REP	Responsabilidad Extendida al Productor/importador
RNP	Registro Nacional de la Propiedad
RTV	Revisión Técnica Vehicular
USABC	The United States Advanced Battery Consortium LLC

VE

Vehículo Eléctrico

GLOSARIO

Batería para vehículo eléctrico: celda o conjunto de celdas que conforman el paquete acumulador de energía eléctrica, según los requerimientos técnicos del fabricante.

Generador: persona física o jurídica, pública o privada, que produce residuos de baterías de ion-litio debido al uso de un vehículo eléctrico con batería de este tipo.

Periodo de vida útil primario: periodo de vida útil de la batería dentro del vehículo eléctrico.

Periodo de vida útil secundario: periodo de vida útil de la batería en otras actividades o equipos posterior a un uso primario en el vehículo eléctrico.

Vehículo eléctrico: Todo bien mueble impulsado con energía cien por ciento eléctrica o con tecnología de cero emisiones y que no contenga motor de combustión, en su versión de automóviles, motocicletas, bicicletas, microbuses, buses (autobús), trenes y cualquier otro que cumpla las características.

Vehículo eléctrico usado: aquel bien mueble impulsado con energía ciento por ciento eléctrica o con tecnología de cero emisiones y que no contenga motor de combustión en su versión de automóviles, bicicletas, motocicletas, vehículos de transporte de carga, microbuses, autobuses y cualquier otro que cumpla las características.

RESUMEN

El Plan Nacional de Transporte Eléctrico contempla el proceso de sustitución de los vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos; sin embargo, hay etapas del ciclo de vida de estos equipos que no se abarcan de manera concreta, como sucede con el manejo de los residuos generados posterior al periodo de vida útil de los vehículos. Esta situación genera un problema con respecto al manejo integral de las baterías de ion-litio empleadas en los vehículos eléctricos que circulan en el país una vez agotadas.

El objetivo de este trabajo es generar una propuesta para la gestión de las baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en Costa Rica. En la metodología se efectuó una revisión bibliográfica sobre las opciones de manejo presentadas en la literatura y las medidas que se llevan a cabo en otros países, así como entrevistas a expertos en el tema del manejo de residuos y baterías de ion-litio de vehículos eléctricos en el país, también se estudió a fondo el contenido de los planes y reglamentos nacionales relacionados con el transporte eléctrico.

De los resultados se concluye que Costa Rica actualmente no cuenta con la capacidad para gestionar las baterías de ion-litio de la matriz vehicular; sin embargo, cuenta potencialmente con las capacidades técnicas, operativas y logísticas necesarias para realizar a futuro la gestión integral de las baterías de los vehículos integrando los procesos de reúso y reciclaje. Sin embargo, en el país no hay claridad sobre qué ruta van a seguir las baterías de los VE una vez que se agotan, más allá de la iniciativa presentada recientemente en la *Hoja de ruta para la gestión eficiente y ambiental de las baterías de los vehículos eléctricos en Costa Rica*.

Se propone en primer lugar, el reúso de las baterías en actividades como el almacenamiento estacionario y conversión vehicular de combustión interna a eléctrico para los vehículos de dos ruedas; y como segunda estrategia el reciclaje y comercialización los materiales recuperados para ser utilizados como materia prima en nuevos procesos de manufactura, tomando en cuenta que se deben fortalecer continuamente las capacidades técnicas y de instalaciones para el desarrollo de las actividades comerciales de reúso y reciclaje a corto, mediano y largo plazo.

Palabras clave: *Baterías de ion-litio, Vehículos eléctricos, Reúso, Reciclaje, Gestión Integral*

ABSTRACT

The National Electric Transportation Plan contemplates replacing internal combustion vehicles with electric vehicles; however, there are stages in the life cycle of these units that are not covered yet, such as the management of waste generated after the useful life in vehicles. This situation causes a problem with the management of spent lithium batteries used in electric vehicles that circulate through the country.

This work aims to generate a proposal for the management of electric vehicle's lithium-ion batteries in Costa Rica. The methodology consists of a bibliographic review of the management options presented in the literature and measures taken in other countries, as well as interviews with experts about waste management and lithium batteries from electric vehicles in the country.

Costa Rica does not have the capacity to manage lithium-ion batteries; however, it potentially has the required technological, operational, and logistical capabilities to carry out the comprehensive management of lithium-ion batteries, including reuse and recycling processes. However, there is no clarity on which path the electric vehicles batteries will follow once they are depleted; beyond the initiative recently presented in the *Roadmap for the Efficient and Environmental Management of Electric Vehicle Batteries in Costa Rica*.

Finally, as a recommendation is essential to prioritize the reuse of LIBs in activities such as stationary storage and vehicle conversion from internal combustion to electric for two-wheeled vehicles; After the reuse period, the batteries are destined for recycling and the recovered materials are marketed to be used as raw material in new manufacturing processes; taking into account that technical capacities and facilities must be continuously strengthened for the development of commercial reuse and recycling activities in the short, medium and long term.

Keywords: *Lithium batteries, Electric vehicles, Reuse, Recycling, Integral Management*

1. INTRODUCCIÓN

La transformación de la matriz de transporte costarricense de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos (VE) contribuye a la reducción del consumo de derivados del petróleo en el sector energético y a su vez se incrementa el uso de energía renovable. La iniciativa de este proceso de cambio es impulsada por el gobierno para lograr la descarbonización del parque vehicular en el país y cumplir con los acuerdos internacionales firmados como el Acuerdo de París ratificado mediante la Ley N°9405 y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [1].

Debido a ello, el país ha generado documentos estratégicos para dirigir los procesos de cambio necesarios para cumplir con los compromisos adquiridos como el Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050, el Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030 (PNTE) y el Plan Nacional de Energía 2015-2030. A partir de este punto se promueve el cambio hacia una matriz de transporte más sostenible y amigable con el ambiente [1].

El mercado de los vehículos eléctricos se encuentra en desarrollo y con tendencias de crecimiento dentro del territorio nacional desde el año 2010. De acuerdo con los datos del Registro Nacional de la Propiedad (RNP) en Costa Rica se reporta a junio del 2022 un acumulado de 5637 VE con placa que circulan en el país [2].

Los vehículos que transitan por el país eventualmente van a salir de circulación y con ellos las baterías que contienen. Estos residuos deben ser gestionados de manera integral priorizando la jerarquización establecida en la Ley N°8839 Ley para la Gestión Integral de Residuos, así como los reglamentos y normativa correspondientes vigente en el país. Es importante atender adecuada y oportunamente aquellos VE que salgan de circulación y comiencen a integrar la corriente de residuos con el fin de evitar impactos negativos a la salud y el ambiente.

El presente trabajo tiene como propósito generar una propuesta de partida que incorpore los elementos esenciales para la gestión integral de las baterías de ion-litio de VE de la matriz vehicular costarricense. Para ello se efectuó un análisis bibliográfico del contexto internacional y nacional, entrevistas a expertos y encuestas a usuarios. A partir de este análisis se pretende generar una propuesta para la gestión integral de las baterías de ion-litio

que se ajuste al marco legal competente al manejo de residuos y acorde con las capacidades técnicas, operativas, logísticas y otros recursos con los que cuenta el país.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Generar una propuesta de partida que incorpore los elementos esenciales para la gestión integral de las baterías de ion-litio de vehículos eléctricos en Costa Rica

2.2. Objetivos específicos

1. Definir el alcance del Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030 con respecto a la gestión de los residuos de las baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos.
2. Evaluar el potencial de gestión de las baterías de ion-litio de vehículos eléctricos en Costa Rica generados por el cambio en la matriz de transporte eléctrico.
3. Evaluar la posibilidad de reúso y reciclaje como parte de la gestión de los residuos de las baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos para Costa Rica.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Baterías de ion-litio en vehículos eléctricos

Las LIBs se caracterizan por su alta densidad de energía, baja tasa de autodescarga, poco peso y un periodo de vida útil mayor respecto a otros tipos de baterías. Estas características hacen de las LIBs una opción con mayores ventajas para ser utilizadas como fuente de energía en VE con respecto a otros tipos de acumuladores de energía que existen en el mercado [3].

Los VE funcionan a partir de un sistema de batería que almacena la energía eléctrica que requiere el vehículo. La batería está compuesta por paquetes que poseen varios módulos integrados por celdas (ver Fig. 1); en donde, cada celda posee un ánodo, un cátodo, una membrana de intercambio y su respectivo electrolito para permitir el transporte iónico [5].

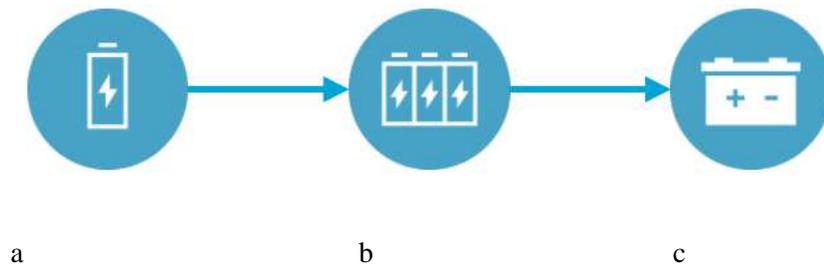


Fig. 1. Conformación de la batería a) celda, b) módulo, c) batería. [4]

Las celdas de los VE pueden tener diferente geometría de acuerdo con la empresa que los manufactura y las características requeridas por el vehículo para el que se van a destinar. Las geometrías que se pueden encontrar en las celdas de las LIBs se muestran en la Fig. 2 y corresponden a: celdas de bolsa, celdas cilíndricas o celdas prismáticas [4][6].

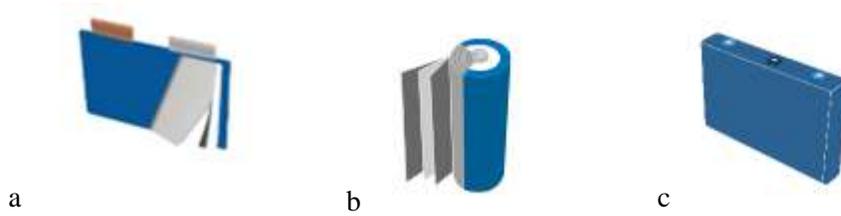


Fig. 2. Geometría de las celdas de litio a) bolsa, b) cilíndrica, c) prismática. [4]

En cuanto a su composición, en el ánodo generalmente se emplea grafito para su elaboración mientras que, en el caso de los cátodos existen diferentes composiciones químicas a partir de las cuales son elaborados. Los VE que se encuentran en el mercado emplean baterías con diferentes composiciones químicas; cabe destacar que, las detalladas en la TABLA 1 presentan litio en su composición. La cantidad de litio en una batería respecto a los otros materiales que la componen depende de la composición química de la batería [7].

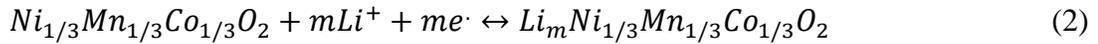
TABLA 1
Composición de los diferentes tipos de baterías ion-litio

Tipo	Abreviatura	Material del cátodo	Material del ánodo	Arreglo geométrico del mineral
Óxido de litio y cobalto	LCO	LiCoO_2	Grafito	Capas
Óxido de litio y manganeso	LMO	LiMn_2O_4	Grafito	Espinela
Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto	NMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$	Grafito	Capas
Fosfato de litio y hierro	LFP	LiFePO_4	Grafito	Olivino
Óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio	NCA	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$	Grafito	Capas
Titanato de litio	LTO	LMO o NMC	$\text{Li}_2\text{TiO}_3/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	Espinela

Nota: Tomado de [8].

3.1.1. Funcionamiento

Durante el proceso de operación de la batería ocurren reacciones de oxidación-reducción en el ánodo y cátodo. Las reacciones de carga y descarga ocurren de manera inversa entre sí. Para una celda con ánodo de grafito la reacción (1) representa el proceso que ocurre en el ánodo cuando la batería se somete al proceso de carga-descarga; la reacción de reducción ocurre durante el proceso de carga mientras que la reacción de oxidación tiene lugar durante la descarga. La reacción que ocurra en el cátodo va a depender de su composición, en donde, por ejemplo, para un cátodo de composición NMC (ver TABLA 1) ocurre la reacción (2) [7][9].



Cada ciclo de operación comprende una etapa de carga y una de descarga del acumulador eléctrico que se llevan a cabo mediante reacciones químicas que ocurren dentro de cada celda que compone la batería, como se muestra en la Fig. 3. Debido al uso del vehículo, la batería va a sufrir un proceso de descarga progresivo hasta llegar a un punto de carga mínima en el que la unidad requiere ser cargada nuevamente [7].

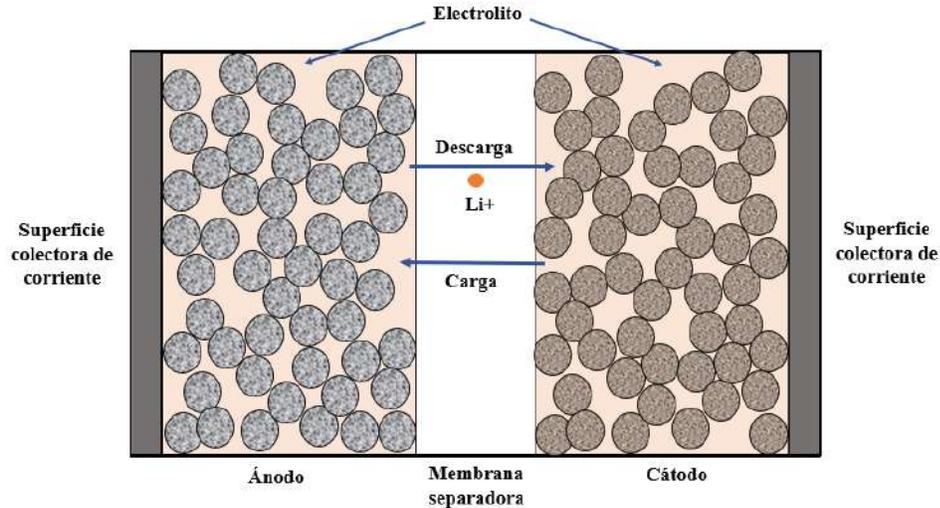


Fig. 3. Esquema de la dinámica de carga-descarga para cada ciclo de operación en una celda. [7]

La carga y descarga de la batería es administrada mediante un *software* y el BMS: estos permiten que el proceso se dé de forma uniforme en todos los módulos de la unidad [10].

3.1.2. Vida útil

Durante el funcionamiento de la batería se dan reacciones secundarias internas que van reduciendo la cantidad de litio capaz de realizar los procesos de carga y descarga de la batería y generando subproductos que afectan su capacidad de carga [3].

En los ciclos de operación de la batería (carga y descarga eléctrica) ocurren reacciones entre el ánodo litiado con el alquilo carbonato que compone el electrolito de la celda. Como resultado de las reacciones se pueden generar compuestos sólidos que contienen litio y que pueden generar gases con potencial inflamable durante su descomposición [7]. La tasa de incidencia de estas reacciones va a variar de acuerdo con aspectos como la temperatura del lugar, la configuración y las condiciones de uso a las que se someta el vehículo; por ende, el periodo de funcionamiento de las baterías en los VE puede variar entre un vehículo y otro [3].

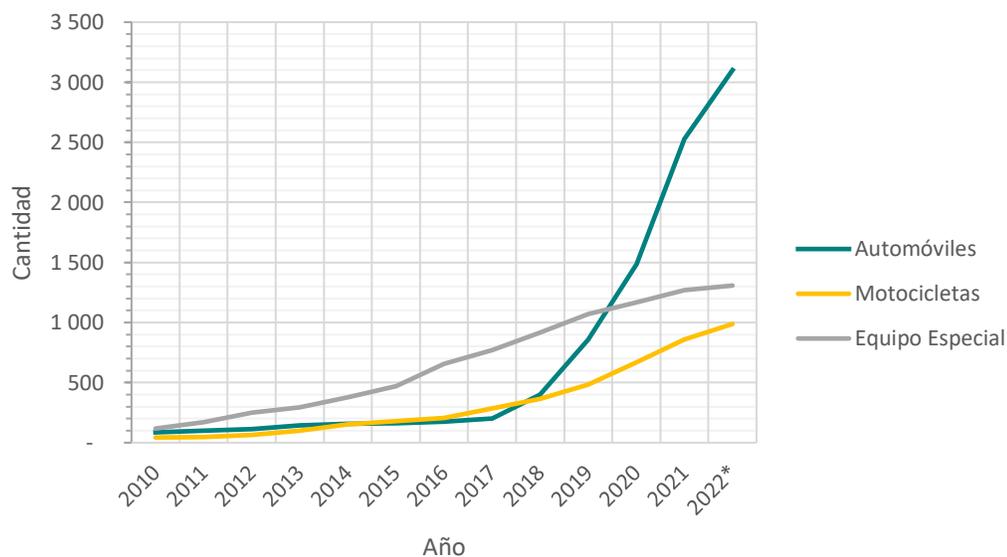
Los productos de la reacción se depositan sobre la superficie del ánodo formando una película que afecta la reacción electroquímica que permite el funcionamiento adecuado del vehículo [9]. Debido a esto, en un momento dado del periodo de vida de la batería, su capacidad máxima de carga va a ser menor al nivel requerido para el funcionamiento del VE y, por ende, se reducirá su autonomía [3]. La batería llega a este punto cuando disminuye su capacidad hasta un 70-80% de su capacidad máxima inicial de carga [11].

El diagnóstico del estado de las baterías en los VE se puede dar mediante el análisis de datos en laboratorio o a partir del uso de indicadores de daño basados en datos históricos obtenidos mediante el monitoreo en tiempo real del desgaste de las baterías de ion-litio de algunos VE [3].

3.2. Vehículos eléctricos en Costa Rica

En los últimos años, el uso de los VE en Costa Rica ha ido incrementando de la mano de políticas nacionales relacionadas con el compromiso ambiental del país y el cumplimiento con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en la agenda 2030 por La Organización de las Naciones Unidas (ONU). Dentro de estas se encuentra el Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050 (PND) y el Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030 (PNTE), los cuales buscan un cambio en el modelo de transporte que contribuya a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero [2].

El aumento en el ingreso de estos vehículos al país ha mantenido un comportamiento creciente desde el año 2010 (año de registro de ingreso del primer VE al país según datos del RNP) hasta junio del presente año, como se muestra en la Fig. 4.



**Datos a junio del 2022*

Fig. 4. Vehículos eléctricos en Costa Rica del 2010 al 2022. Basado en [2].

Para promover el uso de los VE, el gobierno ha recurrido al uso de los incentivos para generar un atractivo hacia esta tecnología, como lo han hecho otros países en América Latina. Lo anterior con el fin de superar las barreras que enfrenta la región en torno al proceso de migración de la matriz vehicular hacia la energía eléctrica como el tema de los costos de adquisición y la inversión en infraestructura para sistemas de redes de carga [12].

3.2.1. Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030

El PNTE es una herramienta que busca la transformación tecnológica de la flota vehicular del país tanto en el sector de transporte público e institucional como en el privado. Este cambio busca establecer un modelo de transporte más eficiente y con menores emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a la matriz de combustión interna que lidera actualmente el sistema vehicular costarricense [1].

Este documento se ajusta a las políticas y compromisos ambientales que el país ha adoptado y, además, forman parte del contexto internacional y regional centroamericano: como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Protocolo de Kioto, el Acuerdo de París, los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Estrategia Energética Sustentable Centroamericana 2020 [1].

El PNTE permite articular estas políticas del contexto internacional y de la región con la realidad nacional para poder llevar a cabo los cambios requeridos por Costa Rica en el tema de la transformación tecnológica de la matriz vehicular del país para la descarbonización de este sector. El PNTE considera un marco estratégico enfocado en la eficiencia energética, las energías renovables, la descarbonización de la economía y la sostenibilidad energética [1]. A partir de los principios anteriores, se establecen los mecanismos y estrategias para generar el cambio en la flotilla vehicular en el país.

A su vez, el plan contempla el marco legal la Ley Orgánica del Ambiente N°7554 y la Ley para la Gestión Integral de Residuos N°8839 con el fin de cubrir las etapas del ciclo de vida de los vehículos eléctricos situadas posterior a su periodo de vida útil y los residuos

que se generen por el uso de esta tecnología como lo son las baterías de ion-litio empleadas para el suministro de energía para el funcionamiento del vehículo [1].

3.2.2. Decreto N°9518 Ley Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico

En Costa Rica, existe el Decreto N°9518 Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico, el cual tiene por objetivo promover el uso de los VE en el transporte dentro del territorio nacional. Para ello, se estipulan una serie de beneficios potenciales e incentivos para el usuario relacionados con el uso de los vehículos cuya fuente de energía sea la electricidad y no los combustibles fósiles considerando que la matriz de energía eléctrica costarricense se basa en 99, 20% en fuentes renovables (promedio de los últimos 7 años), obtenida mediante el sector hidroeléctrico, la geotermia, la energía solar y la eólica [13] [14].

Entre estos beneficios se contemplan incentivos fiscales como la exoneración temporal del impuesto a la propiedad sobre el vehículo, así como la exoneración de impuestos para los repuestos de los VE y el pago de parquímetros según decisión de cada Concejo Municipal. Además de los aspectos monetarios, existen otros relacionados con la movilidad en ciertas regiones del territorio ya que los VE debidamente identificados no están sujetos a la restricción vehicular de circulación en el Gran Área Metropolitana [15].

Aunado a los incentivos anteriores y los potenciales beneficios para el usuario de VE en Costa Rica, el gobierno ha promovido la creación de estaciones de carga rápida a lo largo del territorio nacional en puntos estratégicos determinados por aspectos como la demanda y la distancia de viaje versus capacidad de recorrido del vehículo. Esto con el fin de garantizar al usuario de esta tecnología la movilidad y el acceso a diferentes lugares dentro del territorio nacional, como consecuencia de la creciente tendencia en el uso de estas nuevas tecnologías en el país [12] [16].

3.3. Gestión integral de las baterías de ion-litio

El abordaje de los residuos de las baterías de ion-litio LIBs se debe dar desde la perspectiva de la economía circular, procurando así su valorización una vez agotadas y/o la reincorporación de sus componentes a la cadena de producción y ciclo de vida de otro producto. De esta forma, se garantiza la disponibilidad de las reservas de las fuentes de litio a futuro y no su escasez a corto a plazo; fomentado de esta manera la eficacia de los sistemas de producción que lo emplean como materia prima [17].

La economía circular para el ciclo de vida de las LIBs se muestra en la Fig. 5 y aborda el diseño, la obtención de la materia prima, el proceso de producción, la distribución, el uso, la acumulación post uso y la disposición final [19]. En Costa Rica, actualmente, solo se llevan a cabo cuatro etapas de las antes mencionadas ya que, el diseño, la obtención de materia prima y la producción de las baterías actualmente no se desarrollan dentro del territorio costarricense. Sin embargo, el uso de los VE que contienen LIBs está incrementando en el país y conjuntamente, la generación de este residuo asociado.

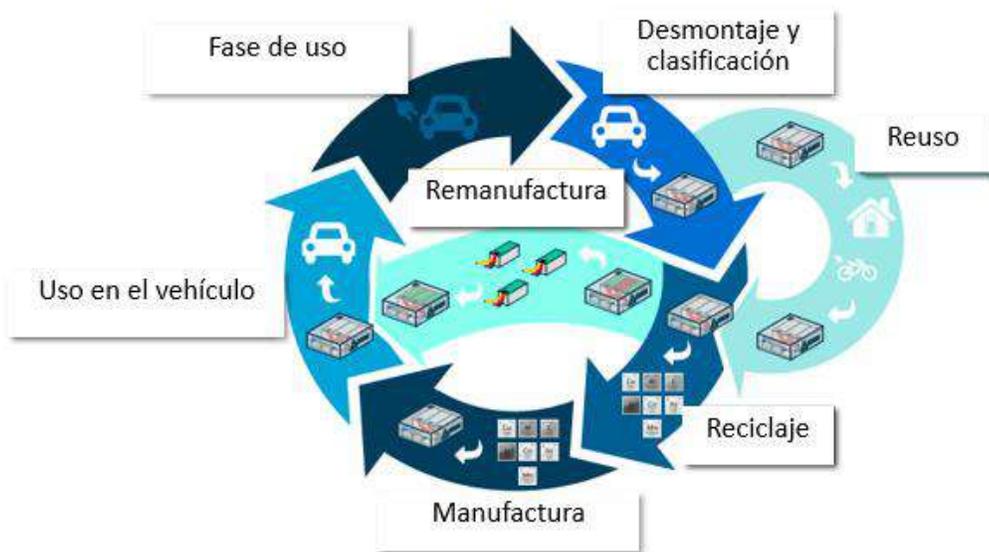


Fig. 5. Economía circular para el ciclo de vida de las LIBs. [18]

Para que la batería llegue al sitio en que va a ser sometida a reuso o reciclaje debe pasar a través de un proceso que abarca desde el punto de extracción del vehículo en el que se encuentra hasta el sitio final donde será gestionada de manera integral (ver Fig. 6). Entre ambas etapas del proceso, se encuentra la mediación de los puntos de consolidación que funcionan como canales de recolección para destinar las baterías a reuso o reciclaje. El proceso también puede ocurrir sin la intervención de estos puntos; es decir, que el proceso de logística suceda de manera directa [8].

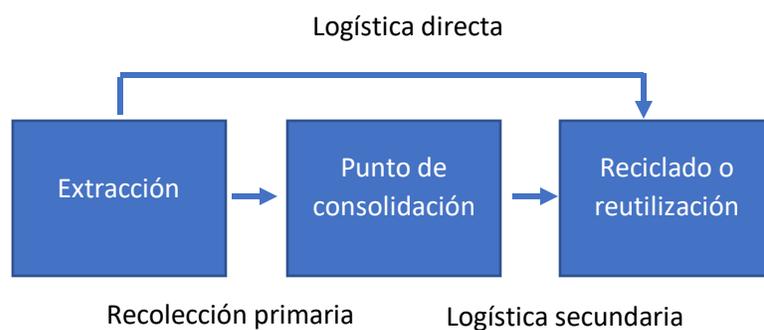


Fig. 6. Logística de rutas para la disposición de una batería de vehículo eléctrico. [8]

En Costa Rica, el Ministerio de Salud es el ente gubernamental encargado de fiscalizar el manejo de los residuos sólidos en el país, el cual debe procurar el manejo integral apegado a la legislación y que no conlleve riesgos para la salud y el ambiente.

Para el caso de las baterías de los vehículos, es importante realizar un diagnóstico previo a la posibilidad de reuso que permita conocer su estado de salud, así como su idoneidad para ser empleada en otra actividad. Existen diferentes organismos que han establecido una serie de lineamientos para el proceso de diagnóstico de las LIBs. Algunas de las pruebas que se sugieren realizar de acuerdo con *The United States Advanced Battery Consortium LLC (USABC)* se muestran en la TABLA 2.

TABLA 2
Pruebas para diagnóstico del estado de salud de la batería según USABC

Prueba	Resultados
Capacidad estática	Capacidad del dispositivo en amperios-hora a una tasa de descarga de corriente constante $C/3$ (capacidad nominal). Si el dispositivo no logra estabilidad después de 10 descargas se debe notificar.
Carga de alta tasa	Capacidad para proporcionar una parte de la capacidad operativa con una carga de corriente constante durante 15min.
Caracterización de potencia de pulso híbrido	Capacidad de potencia dinámica sobre el rango de voltaje utilizable por el dispositivo mediante pulsos de descarga y regeneración.
Potencia máxima	Capacidades de potencia de pulso de descarga de 30s en cada incremento del 10%.
Autodescarga	Pérdida de capacidad temporal debido al reposo de la batería durante 30 días a 30°C.
Rendimiento térmico	Capacidad de cumplir con el objetivo de potencia máxima de la batería a varias temperaturas.
Ciclo de vida	Cuando la potencia máxima y la energía disponible son inferiores a la energía requerida.

Nota: Elaborada con información de [20].

3.3.1. Reúso

De acuerdo con el artículo 4 de la Ley para la Gestión Integral de Residuos N°8839, existe un principio de jerarquización en la gestión integral de los residuos en el cual se establece que previo a emplear un tratamiento de valorización como el reciclaje, se debe considerar la reutilización de los residuos en la misma actividad productiva como parte de una nueva actividad o dentro de la cadena producción [21].

Las LIBs empleadas en los VE pasan a ser residuos cuando ya no poseen la capacidad de almacenar la carga necesaria para abastecer a los vehículos con la energía que requieren para funcionar (aproximadamente al 80% de la capacidad original de carga). Sin embargo, estos acumuladores tienen capacidad de carga residual que les permite ser empleados en otras actividades donde se requieren menores rendimientos energéticos como en el sector doméstico, agrícola o comercial mientras su estado de salud así lo permita [10] [19].

Las condiciones al final del periodo de vida útil de las LIBs en el sector transporte no son iguales para todas las baterías; por ende, antes de ser utilizadas se debe analizar el rendimiento eléctrico para determinar su viabilidad para ser empleadas en otras actividades, esta etapa de diagnóstico previo al segundo uso es vital. Las baterías con potencial para un segundo periodo de vida se someten a un proceso de remanufactura donde se realiza la evaluación de rendimiento, se analiza su química y se genera un remodelado para los módulos de la batería aptos para un nuevo uso [22] [23].

La vida útil de la batería de ion-lito rehabilitada dependerá de la actividad a la que se someta y la demanda de energía almacenada en la batería que es requerida por la actividad o equipo que realice el consumo de energía [23]. Las LIBs que ya no son aptas para el sector automotriz pueden ser utilizadas para abastecer de energía a máquinas de limpieza, equipo agrícola y de construcción, sistemas de elevación, sistemas de bombeo, bicicletas eléctricas, sistemas de almacenamiento de energía, entre otros equipos que tienen una demanda de energía menor a la de un VE [17]. El reúso de las LIBs genera un aporte para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de otros sectores mediante la sustitución del uso de combustibles fósiles en algunos equipos por energía eléctrica.

De acuerdo con el contexto internacional, países como Canadá emplean la norma ANSI/CAN/UL *Standard for Evaluation for Repurposing Batteries* como referencia para determinar la viabilidad para segunda vida de una LIB que haya terminado su periodo de vida dentro del vehículo, debido a que como país no cuentan con legislación propia respecto al tema de reúso. En otras latitudes como la Unión Europea, si bien no hay legislación al igual que en Canadá, existen propuestas de reglamento que establecen como meta establecer la reutilización de las LIBs de los VE como obligatoria para todas aquellas unidades que se encuentren en condiciones de ser sometidas a la extensión de su periodo de vida útil en otra actividad. Para el caso de la región latinoamericana, en el caso de países como Chile y Colombia, hay interés en desarrollar proyectos de reúso; sin embargo, tampoco hay normativa en el tema [8].

3.3.2. Reciclaje

El reciclaje de las LIBs tiene como objetivo introducir el material recuperado al ciclo de vida de productos que requieran litio, cobalto y otros elementos para algunos de sus componentes en lugar de llevar a cabo el proceso de extracción de materia virgen que conlleva problemas sociales, ambientales y económicos. Para llevar a cabo este proceso, la batería debe ser sometida a procesos de descarga profunda y desensamble previo [19][24]. El proceso de reciclaje permite el desarrollo de actividades comerciales asociadas a él y contribuye con la gestión integral de los residuos generados.

Los residuos de LIBs que se destinen al proceso de reciclaje deben ser capturados de la corriente de residuos de manera oportuna con la finalidad de evitar el deterioro y la pérdida de valor para este proceso. Además, se debe tomar en cuenta que el mal manejo de estos residuos puede generar la incidencia de accidentes durante la manipulación; por ende, la pronta recolección de los residuos es importante para el proceso [25]. Algunos de los riesgos que se pueden presentar como consecuencia del mal manejo son corto circuitos o problemas de autoignición mientras son almacenadas y sometidas al proceso de reciclaje [9] [26].

El proceso de reciclaje del litio se puede llevar a cabo mediante diferentes tratamientos de acuerdo con el equipo, los recursos económicos y humanos, así como el

enfoque de reciclaje determinado, ya que es posible recuperar otros materiales de las LIBs agotadas. Generalmente, los procesos de reciclaje de las LIBs incluyen una combinación de diversos tratamientos para poder cumplir el objetivo como los mostrados en la Fig. 7. La extracción de los materiales se puede realizar mediante procesos de bio-metalurgia, hidrometalurgia y pirometalurgia. El proceso de reciclaje también puede suceder de manera directa mediante la regeneración del metal, sin someterlo a procesos fisicoquímicos o biológicos [17][26].

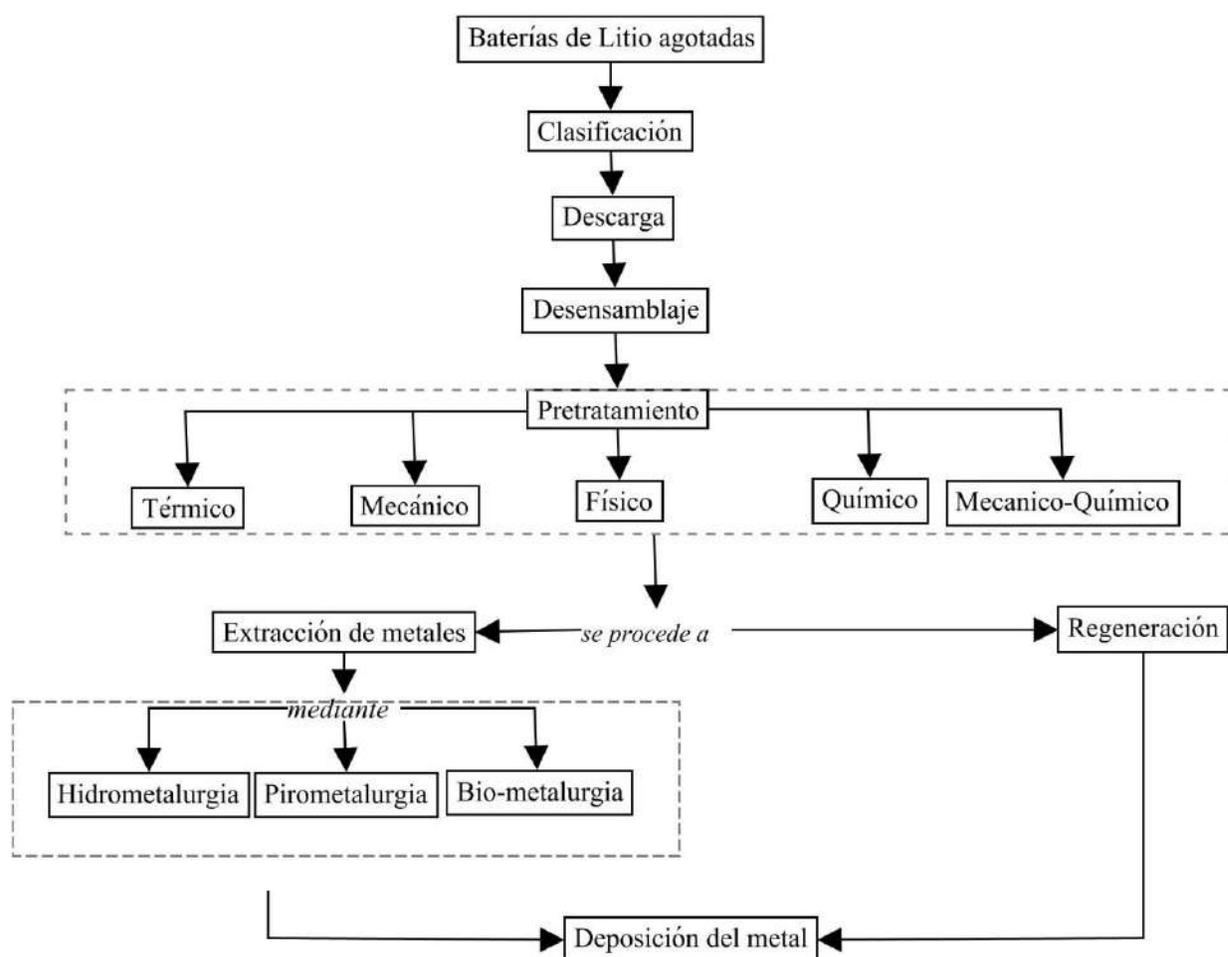


Fig. 7. Esquema general del proceso de reciclaje de las baterías de ion-litio agotadas. [20]

El material recuperado mediante el reciclaje se puede considerar para los procesos de manufactura de cátodos para baterías secundarias recargables como las empleadas en teléfonos celulares y otros aparatos de menor tamaño; solventando la necesidad de extraer

materia prima virgen de las fuentes naturales de litio y los consecuentes impactos que implica este proceso al ambiente.

Es importante considerar la posibilidad del desarrollo del proceso de reciclaje como una etapa más en el manejo de los residuos de las LIBs y de manera paralela o posterior al reúso, en donde ambos procesos se puedan complementar para gestionar de manera integral las LIBs.

El reciclaje es una actividad que está normada en algunas regiones del mundo como en el caso de la Unión Europea, en donde se aplica la responsabilidad extendida al productor y además se establece para este sector porcentajes de material reciclado en baterías; así como porcentaje de recolección del residuo, reciclaje y eficiencia del proceso [8].

Otros países como Canadá no cuentan con normativa propia para reciclaje de LIBs; sin embargo, aplican normativa por estados como en el caso de Columbia Británica en donde se aplica el documento *Environmental Management Act Recycling Regulation B.C. Reg. 449/2004*, para el proceso de reciclaje [8].

Por otro lado, hay países como Japón que cuentan con legislación propiamente para el área del proceso de reciclaje de automóviles, Ley de Reciclado de Automóviles, que regulan a las empresas que realizan el proceso dentro de su territorio; mientras que en el sector de Latinoamérica, para países como Chile y Colombia, hay leyes y/o decretos para el manejo de residuos que regulan el proceso de reciclaje como parte de la gestión integral y de la responsabilidad del productor o importador del bien que genera el residuo; sin embargo, no hay empresas que realicen el proceso de reciclaje en estos países [8].

3.3.3. Consideraciones para el manejo de LIBs de VE

Como se ha mencionado anteriormente, las LIBs presentan características particulares como tamaño, capacidad de carga, composición, entre otros; que las distinguen de otros residuos que se encuentran en el país. Debido a ello existen aspectos relacionados con la manipulación y el tratamiento del residuo que se deben considerar con la finalidad de prevenir accidentes durante todo el proceso asociado a la gestión integral de las LIBs.

1. Área de trabajo y seguridad personal

De acuerdo con [27], las áreas destinadas para manipulación de las baterías deben contar con los equipos adecuados para las operaciones asociadas al trabajo con la batería, así como aspectos de seguridad, en la Fig. 8 se enlistan algunos de los equipos mínimos requeridos en el área de trabajo. Además de los equipos, se deben utilizar equipos de protección personal como guantes dieléctricos con clasificación clase 0 que permitan trabajar en rangos de voltaje superiores a 1000, medidores de voltaje, cajas y materiales aislantes, entre otros. Además, debe haber adecuada rotulación de las áreas de trabajo que indique la designación de las áreas donde se trabaja con altos voltajes y zonas de precaución.

Grúa	Manta aislante	Extintor
Montacargas	Equipo de medición	Botiquín
Equipo para levantar	Cables	Desfibrilador
Mesas	Pértigas de Salvamento	

■ manipulación
■ Seguridad

Fig. 8. Equipo requerido para el área de trabajo con las LIBs. [27]

Otro aspecto relevante es la capacitación mínima requerida para el personal que se desempeñe en esta área, en donde la capacitación mínima requerida se relaciona estrechamente con las actividades que ejecute el personal en cada área de trabajo. Para el

caso de Alemania, se establecen tres niveles de capacitación de personal de acuerdo con las actividades que desempeñe en personal con las LIBs de los VE, estas se presentan en la TABLA 3.

TABLA 3
Nivel de capacitación del personal

Nivel	Descripción de la actividad	Ejemplo	Requerimientos del personal
1	Desarrollar actividades que no involucran electricidad	-Trabajos en la carrocería	Conocer los riesgos de trabajar con sistemas de alto voltaje
2	Establecer condiciones libres de voltaje o actividades electrotécnicas en un estado libre de voltaje	-Desconectar la batería -Establecer condiciones libres de voltaje - Extracción temporal de la batería	Conocimientos en trabajos relacionados con altos voltajes y establecimiento de sistemas libres de corriente
3	Condiciones de voltaje y/o en cercanía de partes activas que se pueden tocar	-Buscar daños en la batería -Cambio de componentes que operen con corriente	Conocimientos para trabajar con sistemas de alto voltaje

Nota: basado en [27]

2. Almacenamiento

Las condiciones adecuadas de almacenamiento de las LIBs contribuyen a evitar el deterioro de las unidades y los posibles riesgos asociados. Debido a ello, la Unión Europea mediante la Directiva 2006/66/EC del Consejo y Parlamento Europeo, establece que las condiciones para almacenamiento son lugares con superficies y cubiertas impermeables; sin embargo, no detalla más condiciones [8].

Por otro lado, en países como Alemania se toman algunas consideraciones más rigurosas respecto a las condiciones generales de almacenamiento de LIBs como se muestra en la TABLA 4.

TABLA 4
Condiciones de almacenamiento de las LIBs

Volumen de almacenamiento	Condiciones
Bajo (1-5 baterías)	<ul style="list-style-type: none"> -No mezclar baterías nuevas con baterías usadas -El área de almacenamiento debe estar separada de otras áreas y rotulada -Las baterías se almacenan descargadas -Debe haber detectores de humo y extintores -Condiciones libres de humedad y con buena ventilación
Medio (6-20 baterías)	<ul style="list-style-type: none"> -No mezclar baterías nuevas con baterías usadas -Emplear espacios cerrados especiales que cumplan con: los requisitos de protección contra incendios F90, un sistema de calefacción y enfriamiento, un sistema de cierre seguro -Mantener siempre cerrado y con acceso restringido -La distancia mínima de esta área respecto a otros edificios debe ser de 5m o separados por muros de protección contra incendios -Debe haber detectores de humo y extintores
Alto (>20 baterías)	<ul style="list-style-type: none"> -No mezclar baterías nuevas con baterías usadas -Emplear espacios cerrados especiales que cumplan con: los requisitos de protección contra incendios F90, un sistema de calefacción y enfriamiento, un sistema de cierre seguro -El lugar de almacenamiento debe ser un edificio independiente exclusivo para esta actividad -Mantener siempre cerrado y con acceso restringido -Contar con salidas directas al exterior -Debe haber detectores de humo y extintores

Nota: basado en [27]

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Estudio del Problema

Se define la muestra a partir de la revisión del Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030, la Ley Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico (N°9518) y la Ley para la Gestión Integral de Residuos (N°8839) que permite identificar y clasificar los actores en categorías de acuerdo con su área de experiencia respecto al tema de las baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos.

Del análisis realizado al PNTE, se identificaron y clasificaron los actores en categorías de acuerdo con su área de experiencia con respecto al tema de las baterías de ion-litio en el sector de la movilidad eléctrica. En la TABLA 5, se detallan las categorías, la población muestral definida al inicio de la investigación, así como la cantidad de encuestas y entrevista efectuadas.

TABLA 5
Sectores identificados y método de recolección de información

Sectores identificados	Población muestral	Entrevistas efectuadas	Encuestas efectuadas	Muestra (%)
Sector comercial: valorización de residuos	6	2	---	33,3
Sector comercial: importadores	31	7	---	22,5
Sector académico: ambiente	4	4	---	100,0
Sector académico: baterías	5	5	---	100,0
Gobierno	8	5	---	62,5
Organismos no gubernamentales	3	1	---	33,3
Usuarios	300*	---	30	10,0

*Asociados ASOMOVE

Para recopilar información de la muestra seleccionada y previamente clasificada, se emplean entrevistas semiestructuradas (

Apéndice 2. Guía para entrevistas) con preguntas

Para el caso de los usuarios de VE además de la entrevista se emplea una encuesta como instrumento para recopilar información (Apéndice 3. Preguntas de la encuesta a usuarios). Esta información se somete a tratamiento estadístico para posteriormente realizar la caracterización del escenario de los VE en Costa Rica.

4.2. Elaboración de la propuesta

Se realizó un análisis bibliográfico respecto al contexto internacional e información académica sobre las LIBs y los VE, así como los posibles procesos posteriores para una LIB a partir de su fin de vida (FDV) dentro del vehículo. Así mismo, se investigan las posibilidades de reúso y reciclaje presentadas en cuatro países diferentes y la Unión Europea.

Posteriormente, se comparó con la información recopilada del contexto nacional, considerando la normativa vigente correspondiente al tema, así como características sociales, económicas y ambientales en el país. A partir de este análisis, se generó la propuesta para el manejo de las LIBs provenientes de los VE en Costa Rica.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Escenario de Vehículos Eléctricos en Costa Rica

De acuerdo con el PNTE, la Ley N°9518, así como los datos del RNP reportados por MINAE, se identificó los VE que circulan en el país. Los vehículos identificados se clasificaron en dos grupos de acuerdo con las características del vehículo (ver Fig. 9), considerando aquellos que no requieren de placa para poder circular.

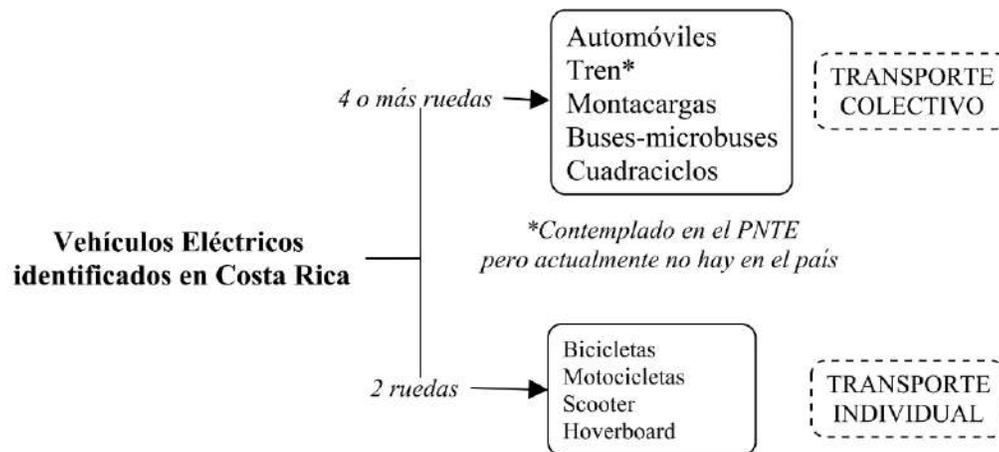


Fig. 9. Vehículos eléctricos identificados en Costa Rica

En la Ley 9518 de Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico, artículo 21, se establece la obligatoriedad en el registro de las marcas de VE ofertados en el país [15]. La oferta de automóviles eléctricos en Costa Rica se distribuye entre 20 marcas registradas que ofrecen a la población 37 modelos diferentes de VE. Para el caso de las motocicletas con placa hay 14 marcas con representación en el territorio nacional [2].

Al comparar la información anterior con la expuesta por ASOMOVE se observa que la asociación tiene registro de algunos vehículos diferentes a los 37 modelos ofertados en el país. Esta diferencia se debe a la importación mediante el mercado gris (importación realizada por personas ajenas a la agencia) o importación por el usuario de un modelo que no se ofrece en el mercado nacional [28]. En la TABLA 19 (sección de anexos), se muestran los modelos que circulan en el país, así como las especificaciones correspondientes sus LIBs.

En Costa Rica, circulan aproximadamente 5637 vehículos que se encuentran inscritos en el RNP, esto al cierre del primer semestre del 2022. Desde el año 2010, se observa la constante tendencia de crecimiento con respecto a la cantidad de vehículos con placa que circulan por el país, siendo estos principalmente automóviles y equipos especiales (carros de golf, cuatriciclos, montacargas, carros de trabajo, entre otros). En la categoría de motocicletas también se incluye a las bicimotos que posean placa [2]. No se contabilizan aquellos vehículos que no poseen placa, como scooter y bicicletas, ya que estos no se encuentran registrados ante el RNP.

Si bien no se conoce el dato concreto de la cantidad de VE individuales que circulan en el país, existen datos de algunos de los modelos que están siendo importados. En la Fig. 10 se muestra la distribución de la capacidad de almacenamiento de energía (potencia) empleada por las LIBs de algunos de los VE de dos ruedas que circulan en el país. Un 57% de estos vehículos poseen baterías que requieren potencias superiores a los 750W para su funcionamiento. El 43% restante, se distribuye en valores de potencia inferiores situados en rangos entre 240W y 600W [29].

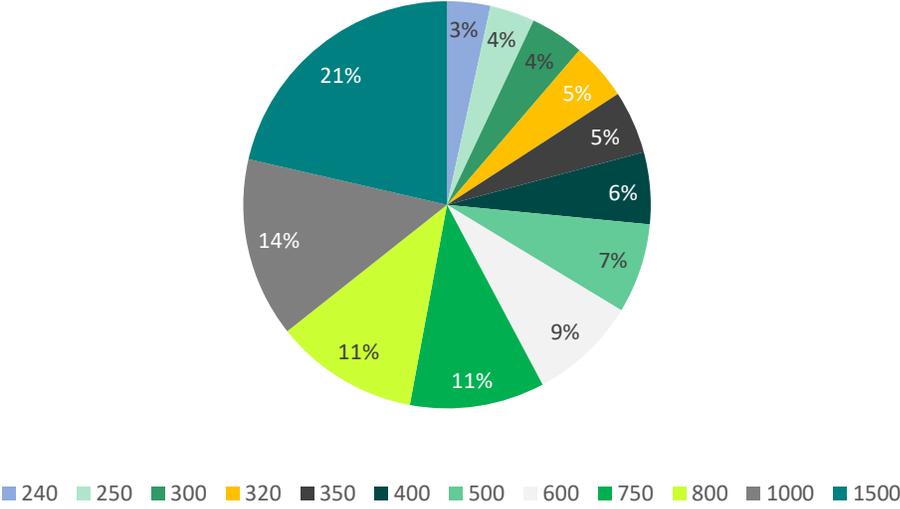


Fig. 10. Distribución de los valores de potencia (W) de los VE individuales disponibles en el país. [29]

En la Fig. 10, no se hace distinción entre los VE de dos ruedas que requieren placa como las motocicletas y los que precinden de esta como en el caso de las bicicletas. Sin embargo, no se incluye la totalidad de los modelos de VE individuales que se movilizan en Costa Rica.

De acuerdo con el PNTE, la flota vehicular se compone en su mayoría de combustibles fósiles derivados del petróleo y solamente un 0,04% del total de la matriz vehicular correspondía a vehículos eléctricos para el 2016 [1]. Sin embargo, la tendencia de consumo con respecto a esta tecnología fue marcadamente creciente para el periodo 2016-2021; según las proyecciones realizadas hasta el 2027 a partir de los datos anuales de importación de LIBs del Ministerio de Hacienda se observa en la Fig. 11 que la tendencia de crecimiento exponencial se mantiene al extrapolar los datos de importación de LIBs hasta el 2030.

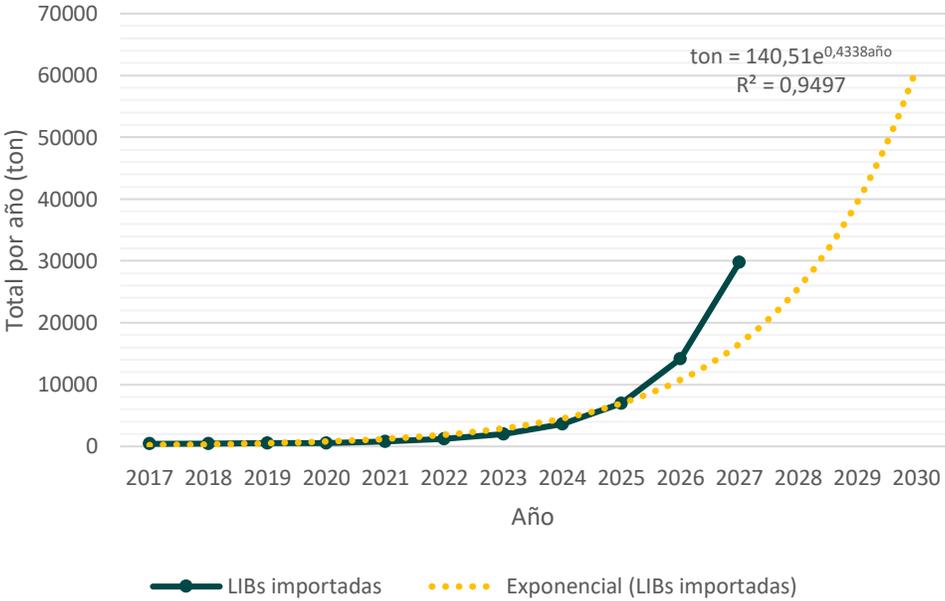


Fig. 11. Tendencia de importación de LIBs en el sector transporte para el periodo 2017-2030. Adaptada de [30].

De acuerdo con proyecciones realizadas a partir de los datos anuales de importación del Servicio de Aduanas del Ministerio de Hacienda y el uso de tasas de crecimiento estimadas de importaciones por código arancelario para vehículos con baterías de ion-litio

mostrados en la TABLA 6, se estima que para el año 2027, el área de mayor importación de estas baterías en el país va a ser el sector de movilidad eléctrico nacional, principalmente provenientes de los vehículos, las bicicletas, las motocicletas y los scooter eléctricos [30].

TABLA 6
Estimación de importaciones de baterías para Costa Rica por código arancelario 2017-2027

Tipo de vehículo	Código HS*	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	Total (por tipo de vehículo)
Automóviles	870380	8	75	115	169	244	536	1 179	2 594	5 706	12 554	27 618	50 798
Motocicletas, bicicletas, scooter	871160	9	30	34	92	207	289	403	562	783	1 092	1 522	5 023
Vehículos especiales	870310	7	14	8	10	6	7	8	9	10	11	12	102
Carretillas sin dispositivos de elevación	870911	1	1	4	2	2	2	3	3	3	3	4	28
Carretillas con dispositivos de elevación	842710	388	325	342	268	362	391	423	458	495	535	579	4 566
Vehículos para transporte de mercancías	870490	3	8	4	2	2	4	5	7	11	16	23	85
Total por año		416	453	507	543	823	1 229	2 021	3 633	7 008	14 211	29 758	---

*Código por producto especificado en el Harmonized System (HS) de la Organización Mundial de Aduanas (WCO)

Nota: Adaptada de [30].

Cómo se observa en la TABLA 6, el aumento en la importación de LIBs, así como su tendencia de crecimiento en las proyecciones, responde al comportamiento del consumidor de vehículos en el país, los cuales paulatinamente van migrando al uso de los VE. Debido a esto es importante conocer las características de usuario de VE en el país ya que están involucrados no sólo en la etapa del consumo del producto sino también en los procesos posteriores a ella.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la encuesta aplicada a 30 usuarios de VE expuestos en la Fig. 12, el 90% de los usuarios de VE corresponde a usuarios de automóviles eléctricos; el porcentaje restante corresponde a usuarios que emplean otros VE como tales como bicicletas, motocicletas, scooter u otros. Este valor coincide con la información brindada por la Asociación Costarricense de Movilidad Eléctrica sobre la composición de sus miembros respecto al VE que poseen. Esta organización reconoce que, dentro de sus miembros, hay un bajo porcentaje de miembros que poseen un VE diferente al automóvil; sin embargo, están trabajando en integrar este sector [30].

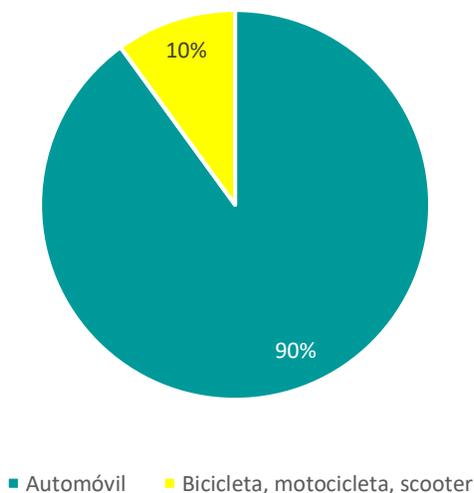


Fig. 12. Distribución de los usuarios de VE según la encuesta aplicada

Debido a esto, las respuestas obtenidas representan mejor a los usuarios de automóviles eléctricos en el país, ya que fueron en su mayoría quienes respondieron. Al analizar el perfil académico del usuario de estos vehículos se observa que en su mayoría

son personas con estudios superiores, representando estos el 73% y el porcentaje restante se distribuye entre diferentes niveles educativos (ver Fig. 13).

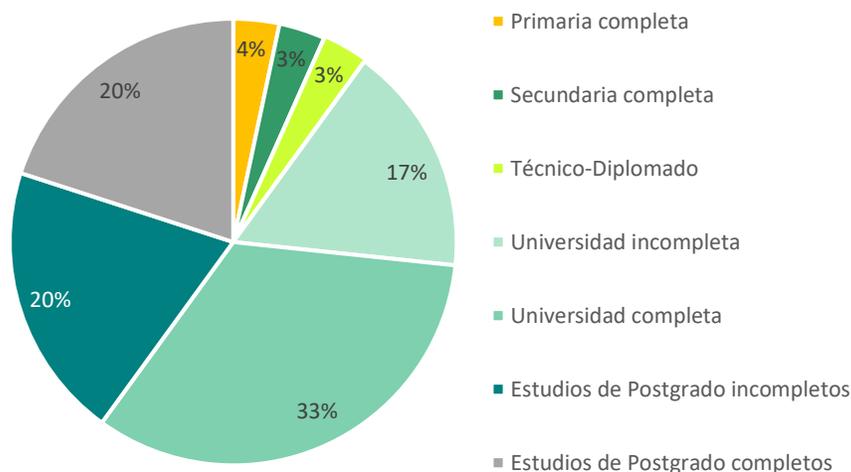


Fig. 13. Perfil académico de los usuarios de VE en Costa Rica

Esto es importante, debido a que, según el nivel académico de los usuarios de VE nacionales, se observa que la mayoría cuentan con estudios superiores y tienen elementos para comprender la dimensión del problema asociada a la mala gestión de residuos. El usuario es un actor importante dentro del tema, ya que de acuerdo con la ley N°8839 es la persona generadora del residuo y según el artículo 43 de este documento, con respecto a las obligaciones de los generadores, dentro de sus responsabilidades se encuentra la separación y entrega de los residuos (en este caso LIBs) a gestores autorizados para garantizar su gestión integral.

Por otro lado, dentro de los encuestados, el 83% indica vivir y desplazarse dentro de la Gran Área Metropolitana (GAM) principalmente; de manera ocasional circulan fuera de esta área. El 17% de usuarios restantes, se ubican en las provincias de Cartago, Heredia, San José, Limón y Alajuela en sectores externos a la GAM; ninguno se ubica en las provincias de Guanacaste y Puntarenas. De acuerdo con ASOMOVE, sus asociados se movilizan principalmente dentro de la GAM y realizan traslados que acumulan semanalmente un promedio de 300km mediante vehículos de uso diario [31].

Al consultar sobre las razones que consideraron para la compra de un VE, lideran principalmente aquellas con rasgos ambientales, tecnológicos y de beneficios e incentivos impulsados por el gobierno (ver Fig. 14). Dentro de estas, destacan aspectos de eficiencia energética del transporte, los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la crisis climática, la matriz energética renovable del país, la reducción de la huella de carbono personal, las políticas nacionales ambientales y el uso de nuevas tecnologías de transporte disponibles en el mercado.

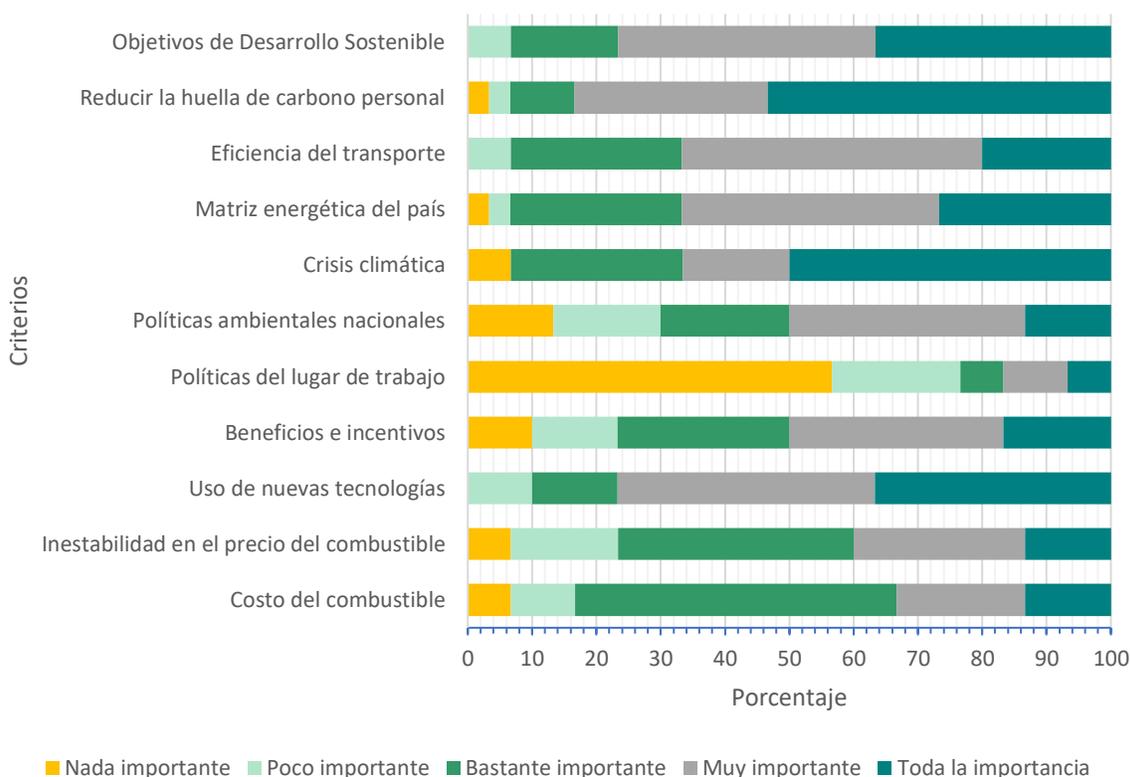


Fig. 14. Aspectos que influyen en la compra de un VE

Los aspectos ambientales son cada vez más relevantes en la decisión del usuario de adquirir un VE en el país, por lo que estos aspectos también podrían ser relevantes para el usuario al momento del manejo del residuo. Además, a esto se le debe añadir el comportamiento de crecimiento en el consumo de estos vehículos a partir del 2018, año en el que se impulsa desde el gobierno el uso de VE en Costa Rica mediante el PNTE y la Ley N°9518 y los objetivos nacionales de descarbonización del país según el PND [30]. El peso

de los criterios ambientales resulta de importancia al considerar la dependencia que existe entre el usuario y el destino que va a tener la LIB de su VE, lo cual puede contribuir a gestionar la batería de manera integral una vez finalizado su periodo de vida dentro del vehículo que la contiene.

El uso de nuevas tecnologías es un aspecto que tuvo mucho peso durante la entrada de los primeros VE al país, los usuarios de estos realizaron la importación mediante el mercado gris (no importa la agencia) con miras a utilizar las tecnologías de transporte que se estaban introduciendo en otras latitudes. Actualmente, las agencias con opciones de VE que funcionan en el país ofrecen al usuario acceso a las nuevas tecnologías del mercado brindando, además, beneficios de garantía y cobertura de mantenimiento sobre el VE, según lo indicado por los representantes de agencias entrevistados.

Aspectos como el costo de la gasolina no resultaron ser determinantes en la decisión del usuario al aplicar la encuesta; sin embargo, con el aumento de los combustibles cada vez son más las personas que deciden comprar un VE por estos motivos. Esto se observa con el incremento en el uso de VE de dos ruedas en el territorio nacional [31].

Si bien no hay claridad en el registro de cómo y dónde se están comercializando los vehículos de dos ruedas en el país, ni del perfil del comprador, hay negocios destinados a comercializar estos vehículos que han indicado que a julio del presente año ya vendieron lo que tenían proyectado comercializar durante el 2022 y consideran como aspecto influyente la inestabilidad en el precio de los combustibles. Esto indica que el sector de los usuarios de VE de dos ruedas está en aumento dentro del país [31].

5.2. Alcance del PNTE para el manejo de residuos de baterías de vehículos eléctricos

El PNTE plantea la necesidad de establecer medidas para afrontar el impacto del cambio impulsado en la matriz de transporte del país en el área del manejo adecuado de los residuos de baterías y otros repuestos utilizados en los VE; sin embargo, el plan no presenta una propuesta concreta sobre el manejo de los residuos asociados a este cambio. No

obstante, el PNTE sí puntualiza el desarrollo de un indicador de gestión y un indicador de resultados para el manejo de los residuos asociados a los VE [1]:

1. Los programas aprobados sobre manejo de residuos de baterías y otros repuestos asociados directamente a los VE.
2. El porcentaje de cumplimiento de los programas planteados en el punto anterior.

Para poder aprobar y evaluar el porcentaje de cumplimiento de los programas, primero es necesario que estos existan y sean adaptados a las características del mercado de los VE en el país. Para el desarrollo de estos programas, se debe tomar en cuenta la Hoja de ruta elaborada en torno a las LIBs de los VE, la cual considera aspectos como: el tamaño y la variedad en la composición de las baterías de los vehículos disponibles en el comercio y medidas para dar seguimiento a estas baterías desde su ingreso al país [8].

En cuanto a las personas entrevistadas del sector gobierno, se les consultó sobre la existencia de estos programas en el país y un 67 % afirman la nula existencia de estos programas hasta la fecha y el 33 % restante indican desconocer si existen alguno o no (ver Fig. 15). Esto confirma la poca o nula presencia de programas para el manejo de residuos de baterías y otros repuestos asociados directamente a los VE gestionados desde el gobierno.

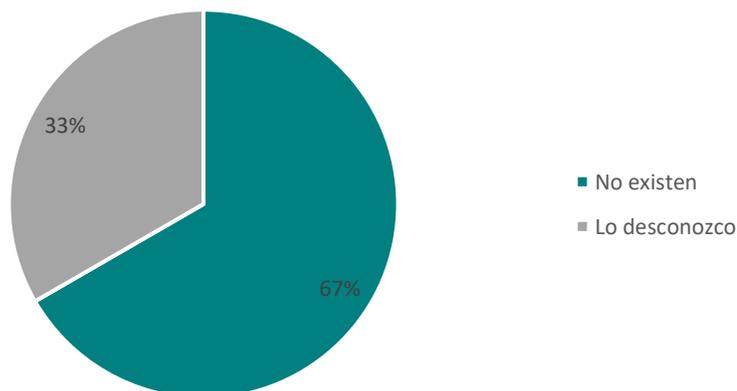


Fig. 15. Programas sobre manejo de residuos de baterías y otros repuestos asociados directamente a los VE del PNTE de acuerdo con el sector gobierno entrevistado

5.3. Gestión de las baterías de ion-litio

Además de contribuir a la descarbonización del país, se pueden generar otros impactos positivos a nivel ambiental debidos al uso de los VE. Los expertos en el área ambiental detallan los siguientes:

- Disminución de ruido asociado a la movilidad.
- Mejoras en la eficiencia energética del sector movilidad.
- Desarrollo de un parque vehicular que emplea energía eléctrica renovable.

También indican la importancia de considerar aquellos impactos perjudiciales para el ambiente, resaltando la mala gestión de los residuos que eventualmente comenzaran a integrarse a la corriente de residuos del país, incluyendo dentro de estos residuos a las baterías de los vehículos.

De acuerdo con las proyecciones para la generación de residuos de LIBs provenientes del sector de transporte eléctrico según las estimaciones de consumo de esta tecnología para el periodo 2022-2027, se observa un incremento constante para el periodo 2022-2027 y una tendencia de consumo de crecimiento exponencial (ver Fig. 16) hasta el año 2030, cuando finaliza el periodo de alcance del PNTE y se evalúan los ODS [30].

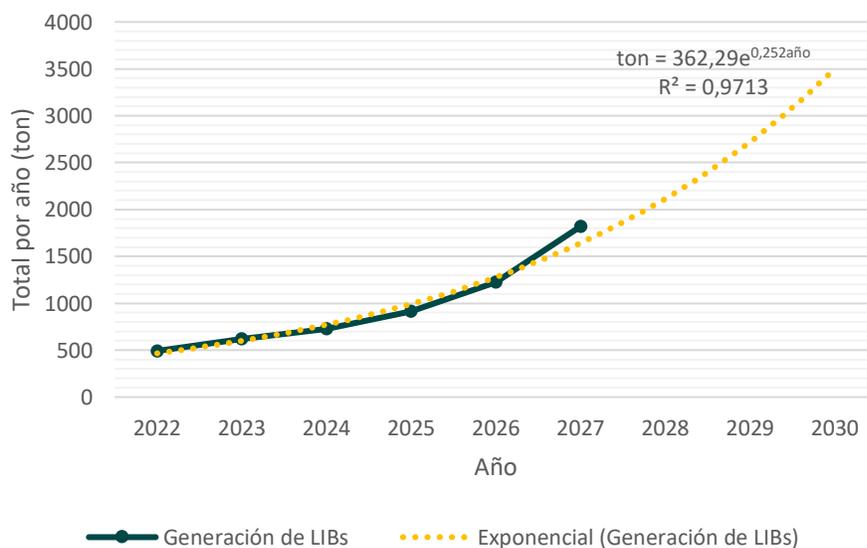


Fig. 16. Estimación de generación de residuos de LIBs en Costa Rica periodo 2022-2030. [30]

De acuerdo con la TABLA 7, la tasa de crecimiento para este periodo se sitúa en un 270% mientras que el porcentaje promedio de crecimiento anual corresponde a 30%. Los principales tipos de vehículos que contribuyen a la generación de residuos de LIBs corresponden a los automóviles y las carretillas representando respectivamente el 37,6 % y 35% del total generado para el periodo proyectado.

TABLA 7
Estimación de generación de LIBs para Costa Rica por código arancelario para el periodo 2022-2027

Tipo de vehículo	Código HS	2022	2023	2024	2025	2026	2027	Total (ton)
Automóviles	870380 870340* 870360* 870220*	100	145	211	318	511	894	2 179
Motocicletas, bicicletas, scooter	871160	57	106	173	262	379	536	1 513
Vehículos especiales	870310	10	10	10	9	8	8	55
Carretillas	870911 842710	322	353	331	320	322	377	2 025
Vehículos transporte de mercancías	870490	3	3	3	4	4	4	21
Total (ton)		492	617	728	913	1224	1819	
Tasa crecimiento anual		25%	18%	25%	34%	49%	25%	---

* Proviene de vehículos híbridos

Nota: Adaptada de [30].

En el PNTE, se detalla el marco legal vigente que compete al manejo de residuos sólidos en el país y que es aplicable al tema de la gestión de las LIBs agotadas provenientes de los VE. Sin embargo, de acuerdo con actores del sector gobierno consultados, el marco legal que posee el país en torno al tema no es suficiente para enfrentar la problemática de las baterías de ion-litio agotadas provenientes de los VE y, de igual manera, estos coinciden en la necesidad de realizar reformas al respecto sobre este tema.

Esto se debe a que, la legislación actual no contempla aspectos como la variedad en la composición de las baterías que circulan en el territorio. Recientemente, se desarrolló en el país la Hoja de ruta para la gestión eficiente y ambiental de las baterías de los vehículos eléctricos en Costa Rica, el cual contempla los aspectos de composición, tamaños, legislación y panorama internacional poder gestionar adecuadamente las LIBs y hasta la fecha el manejo de estos residuos se ha dado bajo la Ley N°8839 y el Decreto N°38272-S Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial [8].

En octubre del 2021, los artículos 24, 25, 26, 27 y 28 de la Ley N°8839, fueron adicionados mediante el artículo 2 de la Ley N° 10 031 (Reforma Ley para la Gestión Integral de Residuos) como parte del Capítulo IV: Responsabilidad del productor de residuos prioritarios. En estos artículos se establece una lista de productos prioritarios dentro de los que se incluyen las baterías y pilas, sin hacer distinción de la fuente de generación o composición del residuo [21].

De acuerdo con esta reforma, se establece la responsabilidad extendida del productor o importador (REP) de productos prioritarios en donde, se incluyen los periodos posteriores a la fase de producción y consumo del producto. Los productores o importadores deben garantizar sin costo alguno la recolección del residuo y cumplir así con las metas de recolección y valorización establecidas y evaluadas cada cinco años por el Ministerio de Salud para cada residuo prioritario. Además, se indica que todo residuo potencialmente valorizable deberá ser destinado a este fin [21].

La reforma no excluye la participación del consumidor, sino que establece la responsabilidad compartida sobre el residuo generado. Se estipula que los consumidores deben cumplir con la obligación de separar los residuos desde su fuente de origen y hacer la entrega correspondiente de estos en los lugares autorizados por el Ministerio de Salud para tal fin o las personas productoras y/o importadoras del producto prioritario a partir del cual se generó el residuo [21].

Por otro lado, en el Decreto N°38272-S Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial, Anexo I no se incluyen las baterías de ion-litio dentro de la lista de los residuos sobre los cuáles tiene alcance el reglamento. Debido a ello, se limita el poder aplicar este reglamento sobre los residuos de las LIBs de los VE. Sin embargo, el

artículo 5 del reglamento permite incluir residuos nuevos a esta lista a partir de la solicitud ante el Ministerio de Salud y el cumplimiento de los criterios de composición, necesidad de transporte, almacenamiento, formas de uso y valor de recuperación propios para el residuo de acuerdo con el artículo 6, Criterios para declarar residuos como de manejo especial, del Decreto N°38272-S [32].

El incluir a las LIBs dentro del anexo I del decreto anterior, exigiría el establecimiento de unidades de cumplimiento, las cuales con estructuras legales conformadas por importadores y/o productores de productos que generan residuos de manejo especial, que tienen la responsabilidad de establecer mecanismos y acciones para garantizar la gestión integral de sus respectivos residuos, lo cual consecuentemente conllevaría el cumplimiento de la REP [32].

Desde el sector de los importadores de vehículos, hay división con respecto a si la problemática en el manejo de residuos es la misma o no para todos los VE, ya que un 57% de ellos consideran que no hay distinción, mientras que el porcentaje restante hace énfasis en que se debe de considerar aspectos tales como el tamaño del residuo y el periodo de vida útil de la batería dentro del vehículo.

Existen aspectos que influyen en cómo manejar una batería si esta proviene de un VE colectivo o individual. Expertos académicos en baterías indican que es importante conocer que hay diferencia en las composiciones químicas que se emplean en la manufactura de las baterías de acuerdo con el tamaño del vehículo al que se vayan a destinar ya que la potencia y la demanda de energía requerida no es la misma para todos los vehículos. Además, se deben considerar aspectos como el equipo requerido para retirar una batería de un vehículo pequeño con respecto al equipo requerido para llevar a cabo el mismo procedimiento en un vehículo de mayor tamaño.

En Costa Rica el ente rector en el tema de residuos es el Ministerio de Salud y es quien autoriza los gestores físicos y jurídicos para el manejo de los residuos. El reporte de la lista de gestores autorizados generado a abril del 2022 indica que en el país hay 471 gestores de residuo; sin embargo, solo el 14 % de ellos tiene autorización para la gestión de residuos de baterías-pilas de diferentes composiciones, incluyendo litio (Fig. 17) [33].

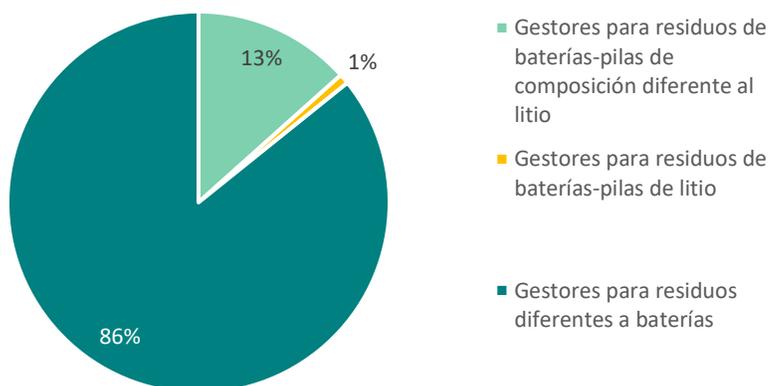


Fig. 17. Gestores de residuos en Costa Rica.

Este 14%, se distribuye entre aquellos autorizados para gestionar baterías-pilas de litio y aquellos que gestionan baterías-pilas de otras composiciones diferentes al litio. La cantidad de gestores con capacidad de manejar residuos de baterías-pilas de litio representan el 1 % del total de gestores de residuos del territorio nacional. El otro 13%, gestiona baterías de composición diferente. Dentro de los gestores que integran este porcentaje no todos gestionan baterías con las mismas composiciones químicas [33].

En el país hay cuatro gestores autorizados para el manejo de baterías de ion-litio, todos ellos cubren las etapas de acopio, transporte y preparación para la valorización. Sin embargo, solo el 50 % de ellos realiza valorización del residuo dentro del país y el porcentaje restante, se distribuye entre la nacionalización y la exportación del producto para ser gestionado afuera, como se muestra en la Fig. 18.

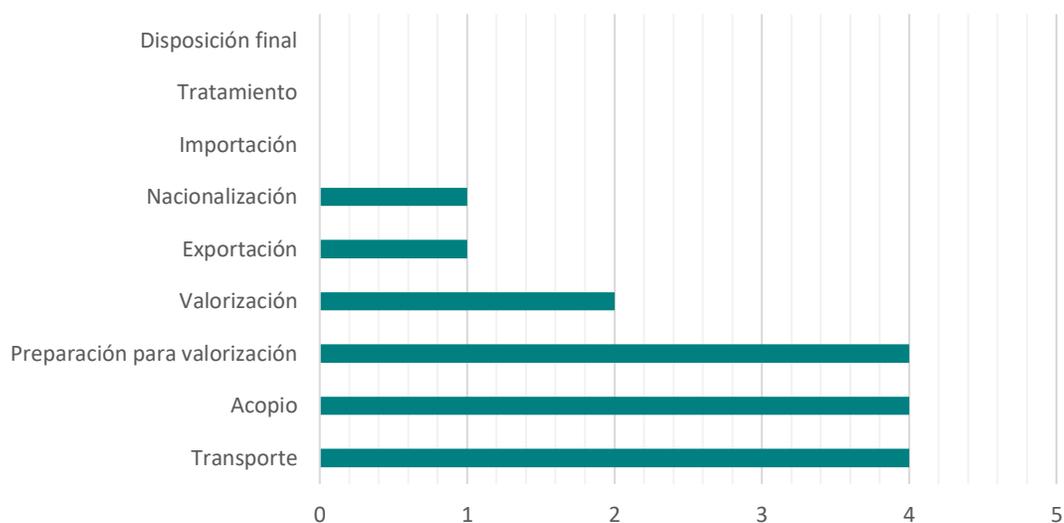


Fig. 18. Gestores de baterías autorizados para cada etapa del proceso de gestión los residuos de las pilas-baterías de ion-litio.

Cabe destacar que, la autorización de estos gestores para el manejo de las baterías-pilas de litio no hace distinción en el origen del residuo; es decir, se parte del hecho de que por ser una batería-pila de litio debe ser gestionada de la misma forma. Pese a ello, se debe reconocer que las capacidades técnicas, logísticas, operativas y de equipo para gestionar LIBs de VE no es la misma que la requerida para gestionar LIBs provenientes de otros residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

Debido a aspectos como el tamaño de la batería, lo cual implica equipo especial para su manipulación ya que algunas de ellas pueden ser muy pesadas. El tema de la composición y capacidad de almacenamiento influyen en cuál va a ser el destino de la batería ya que algunas de ellas pueden tener potencial para ser destinadas a reuso mientras que otras van a requerir ser intervenidas mediante procesos como el reciclaje.

De acuerdo con las personas entrevistadas del sector comercial en el área de valorización de residuos, se determina que es viable desarrollar en el país un sistema de manejo de residuos de LIBs que contemple tanto el proceso de reuso como el de reciclaje de manera conjunta. Además, esta posibilidad se adapta a lo estipulado en la ley N°8839 con respecto a la jerarquización en la gestión integral de residuos en donde, se establece

que se debe priorizar el reuso del residuo generado antes de ser sometido a un proceso que permita su valorización como el reciclaje [21].

En la TABLA 8, se muestra la situación de la regulación en el tema del manejo de las LIBs de los VE para cuatro países de diferentes continentes, así como la Unión Europea. Se observa que en la mayoría de los países existe normativa que regula la gestión de residuos; sin embargo, para el tema de los países latinoamericanos analizados hay temas como el registro de las LIBs, el almacenamiento, la valorización y la disposición de los residuos están pendientes de trabajar.

TABLA 8
Regulaciones para LIBs de VE en el contexto internacional

	Criterio	País- Región				
		Canadá	Colombia	Chile	Unión Europea	Japón
Regulaciones	Gestión de residuos	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Registro y trazabilidad	Sí	No	No	Sí	Sí
	Importadores y consumidores	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Transporte de baterías	Sí	No	No	Sí	No
	Almacenamiento	No	No	No	Sí	No
	Reuso	No	No	No	No	No
	Reciclaje	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Exportación	Sí	Sí	No	Sí	No
	Disposición de residuos	Sí	Sí	No	Sí	Sí

Nota: Datos tomados de [8]

Además, se observa que ninguno de los países contemplados en la TABLA 8 cuenta con regulaciones para el reuso de las LIBs; sin embargo, el tema de reciclaje sí ha sido abordado mediante regulaciones.

5.4. Reuso

Cuando las LIBs cumplen su periodo de vida útil dentro del VE, deben ser sometidas a un proceso de diagnóstico para determinar su estado de salud [20]. A partir de la

información proporcionada por la evaluación, se puede determinar las posibilidades de extender el periodo de vida de la batería hacia un segundo uso en otra actividad o si esta debe ser destinada a un proceso de valorización. El reúso de las LIBs contribuye a compensar el impacto ambiental generado por estas durante el proceso de manufactura ya que se prolonga el periodo de vida útil de la batería [8].

Las LIBs que se consideren apropiadas para ser destinadas a reúso de acuerdo con el diagnóstico previo realizado pueden ser empleadas en diferentes actividades dependiendo de las características y la condición en la que se encuentre la batería. Es importante considerar que en el mercado circulan LIBs con diferentes composiciones, tamaños, geometrías de celda y autonomías; por ende, la evaluación con respecto a en qué actividad se podría emplear la batería para un segundo uso va a ser una situación de análisis propia para cada unidad.

Esto conlleva la necesidad de remanufacturado de los módulos de la batería con el fin de poder adaptarlos para ser destinados para otra actividad, ya que el diseño de la batería está hecho para su uso dentro de un VE específico y no para otra actividad [33]. En la TABLA 9 se muestran estimaciones de los costos de reensamblaje por batería [8].

TABLA 9
Costo de reensamblaje estimado por batería, para vehículos eléctricos

Precio baterías nuevas	Segunda vida	Modelo Vehículo	Factor de salud segunda vida	Precio de mercado baterías reensambladas (US\$/kWh)	Valor de rescate baterías usadas (US\$/kWh)	Costo de reensamblaje US\$
US\$ 250/kWh	60%	BEV75	0,33	83	51	32
		PHEV20	0,29	73	43	30
	50%	BEV75	0,72	180	131	49
		PHEV20	0,65	163	117	46
US\$ 150/kWh	60%	BEV75	0,33	50	24	26
		PHEV20	0,29	44	19	25
	50%	BEV75	0,72	108	72	36
		PHEV20	0,65	98	64	34

Nota: [8]

Se le consultó a los expertos de todos los sectores sobre la existencia de mercado actual para reuso o la posibilidad de desarrollo de este a futuro en Costa Rica y se observa en la Fig. 19 que el 11,1 % considera que no hay posibilidades para el desarrollo de esta actividad en el país; por ende, lo más viable sería buscar otras opciones para gestionar de manera integral estos residuos como lo es el reciclaje de las LIBs o la exportación para que sean tratadas fuera del país.

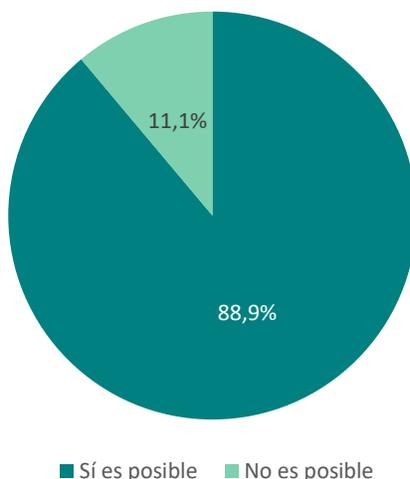


Fig. 19. Posibilidades de reuso de acuerdo con las personas entrevistadas

El resto del grupo consultado representa el 88,9 % y coinciden en que en el país hay y/o se podrían desarrollar actividades comerciales entorno al reuso de las LIBs que ya no satisfacen la demanda energética del VE. De acuerdo con las personas entrevistadas, que indicaron que en el país sí existe la posibilidad de desarrollar un sector de mercado entorno al reuso de las LIBs (ver Fig. 20); el 82 % de ellas indican que en el país las baterías se podrían destinar al sector de almacenamiento de energía para diferentes fines y actividades; el 11 % consideran la posibilidad que se podrían destinar para conversión vehicular de combustión interna a electricidad; mientras que el 7 % restante se refiere a actividades de baja demanda energética.

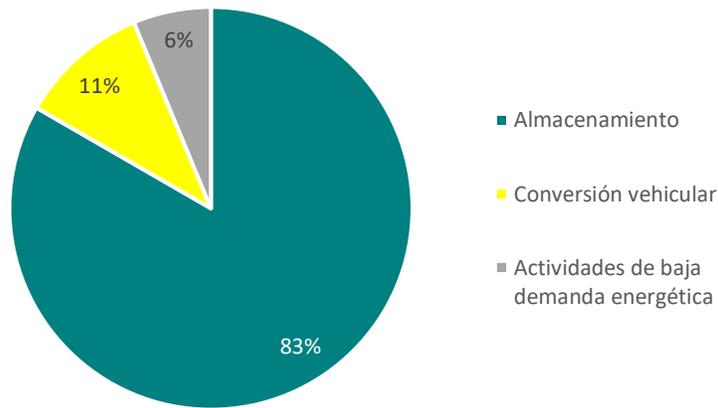


Fig. 20. Clasificación de las actividades de reúso

Algunas de las actividades en las que se podrían emplear las baterías son principalmente el almacenamiento de energía fotovoltaica, ya sea en el sector doméstico o industrial, estaciones de almacenamiento de energía o bancos de carga, así como el uso en vehículos con menor demanda energética que la capacidad que posea la batería en este punto de su vida, como se observa en la Fig. 21.

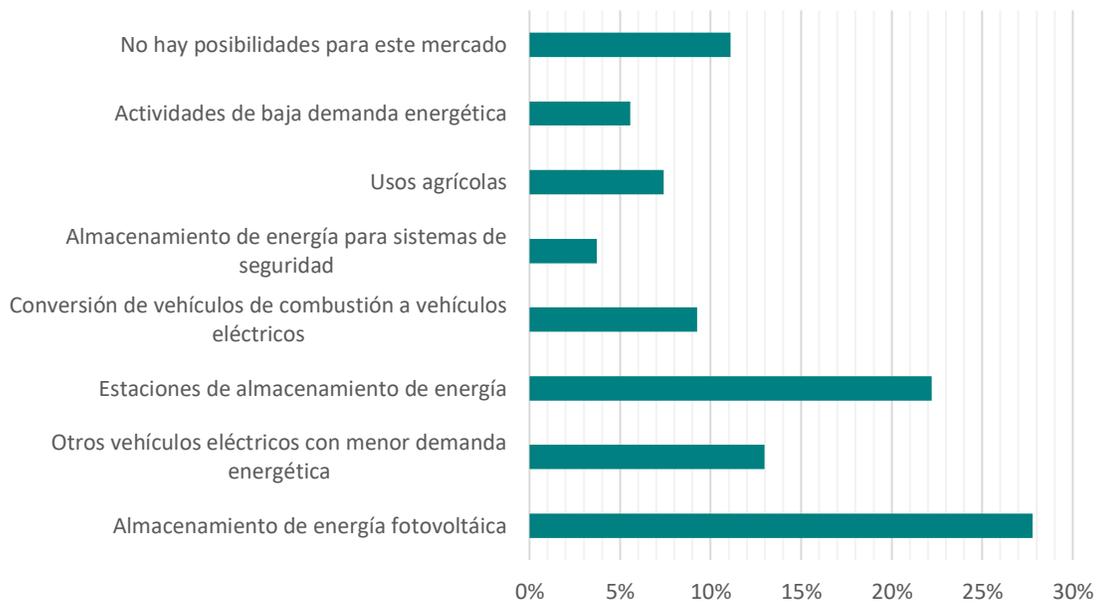


Fig. 21. Posibilidades de mercado para reúso de LIBs según los actores entrevistados

El periodo de uso de la batería dentro del vehículo va a depender de factores como las prácticas de conducción, la potencia de la batería, los ciclos de carga y la demanda de autonomía requerida por el usuario; por ende, este dato puede variar entre dos vehículos con las mismas características, generando que no todas las baterías puedan ser destinadas para reuso en las mismas actividades [31]. Sin embargo, conociendo los ciclos de carga de las LIBs del mercado, la autonomía del vehículo y el recorrido promedio del usuario, se puede estimar la vida de la batería de acuerdo con la ecuación (1).

$$VE_B = \frac{C_c}{\left(\frac{D}{A}\right) * \varepsilon} \quad (1)$$

Donde:

VE_B = Vida estimada de la batería (años)

C_c = Ciclos de carga

D = Distancia recorrida (km/semana)

A = Autonomía del vehículo (km)

ε = 52 (semanas/año)

De acuerdo con los datos de RTV, para el año 2020, en el país los automóviles tuvieron un recorrido promedio semanal de 182 km, mientras que este valor para el año 2021 incrementó a 231 km; por ende, la distancia semanal promedio recorrida durante el periodo 2020-2021 fue de 206,5 km. En la TABLA 10, se muestra la estimación del periodo de vida de la batería de los automóviles eléctricos en Costa Rica empleando la ecuación (1) y un recorrido promedio semanal de 200 km por parte de los usuarios. Además, se considera un intervalo de autonomía para los VE de entre 100 km y 600 km, siendo la autonomía promedio del parque nacional de automóviles eléctricos de 354,14 km (ver TABLA 19 Características de VE colectivos disponibles en Costa Rica) [10] [27].

TABLA 10
Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 200 km

Ciclos de carga	Autonomía (km)					
	100	200	300	400	500	600
1000	9,6	19,2	28,8	38,5	48,1	57,7
1500	14,4	28,8	43,3	57,7	72,1	86,5
2000	19,2	38,5	57,7	76,9	96,2	115,4
2500	24,0	48,1	72,1	96,2	120,2	144,2
3000	28,8	57,7	86,5	115,4	144,2	173,1
3500	33,7	67,3	101,0	134,6	168,3	201,9

Nota: El cálculo se basa en el recorrido promedio de los automóviles en Costa Rica. Se emplean datos de [35] [36].

Al analizar los resultados se observa que el periodo de vida estimado mínimo sería de 9,6 años para un vehículo con 1000 ciclos de carga y una autonomía de 100 km. Además, conforme aumenta la capacidad de autonomía del vehículo y la cantidad de ciclos de carga que se disponen, el periodo de vida estimado aumenta. Pese a ello, el periodo de vida promedio estimado para un automóvil en Costa Rica es de 16 años, mientras que para una motocicleta es de 8 años. De acuerdo con datos del año anterior según RTV solo el 7,9% del parque de automóviles superaba los 31 años de antigüedad y para el caso de las motocicletas este porcentaje corresponde al 1,5% [36].

De acuerdo con ASOMOVE, los usuarios de automóviles eléctricos se desplazan principalmente dentro del GAM y recorren aproximadamente 300 km semanales. Al replicar el ejercicio anterior empleando la ecuación (1) con los datos de la distancia recorrida semanal promedio solamente de los automóviles eléctricos, se observa en la TABLA 11, que el periodo de vida estimado para que la batería agote los ciclos de carga que dispone se reduce respecto al usuario que recorre menor distancia semanal (caso expuesto en TABLA 10).

TABLA 11

Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 300 km

Ciclos de carga	Autonomía (km)					
	100	200	300	400	500	600
1000	6,4	12,8	19,2	25,6	32,1	38,5
1500	9,6	19,2	28,8	38,5	48,1	57,7
2000	12,8	25,6	38,5	51,3	64,1	76,9
2500	16,0	32,1	48,1	64,1	80,1	96,2
3000	19,2	38,5	57,7	76,9	96,2	115,4
3500	22,4	44,9	67,3	89,7	112,2	134,6

Nota: El cálculo se basa en el recorrido promedio de los automóviles eléctricos en Costa Rica. Se emplean datos de [31].

En el Apéndice 4. Estimado de vida de la batería por distancia recorrida, se evalúan otros dos escenarios correspondientes a 100 km y 400 km y en donde se observa la misma relación de comportamiento con respecto al recorrido semanal promedio de los usuarios; entre mayor distancia se recorra, menor será el periodo de vida estimado y viceversa. El sector de manufactura de los VE desarrolla LIBs cada vez más con mayor capacidad lo cual implica que las baterías van a poder permanecer más tiempo en el VE, generando que estas salgan a integrar la corriente de residuos no por su deterioro propio sino por el deterioro del vehículo que las contiene, lo cual indica que las baterías podrían estar en condiciones que les permiten ser empleadas en otras actividades [31].

Otros aspectos para considerar previo a destinar las baterías a alguna actividad de reúso son su composición química, tamaño y geometría de celda. Esto se debe a que algunas de estas unidades van a tener mayor densidad energética presentando mejor desempeño para algunas actividades respecto a baterías con otras características. En la

TABLA 12 se comparan tres celdas de igual composición y diferente geometría con respecto a la densidad energética, la capacidad, el voltaje y la potencia.

TABLA 12
Comparación entre celdas de igual composición y diferente geometría

Fabricante	Composición	Geometría	Peso (kg)	Especificaciones eléctricas			
				Densidad energética (Wh/kg)	Capacidad nominal (Ah)	Voltaje nominal (V)	Potencia nominal (Wh)
CATL	NMC	Prismática	0,99	186,9	50,0	3,7	185,0
LG Chem	NMC	Cilíndrica	0,07	257,1	4,8	3,7	17,5
LG Chem	NMC	Bolsa	0,82	268,1	60,0	3,6	219,9

Nota: basado en datos de [43] [46] [49]

Las celdas NMC son comúnmente empleadas en VE para transporte individual a la relación que presentan entre autonomía por unidad de peso; sin embargo, estas celdas contienen metales contaminantes como cobalto y níquel. De acuerdo con la TABLA 12, para el caso de las tres geometrías evaluadas con composición NMC la que presenta mayor densidad energética es la geometría bolsa LG Chem, mientras que la celda prismática CATL posee menor valor.

En el mercado existen otras composiciones químicas que no contienen cobalto y níquel, como las celdas con cátodo de composición LFP. Estas celdas se encuentran principalmente en vehículos de transporte colectivo de mayor tamaño [8]. En la sección de anexos, Anexo 3. Especificaciones de celdas de litio por geometría (TABLA 22, TABLA 23 y TABLA 23), se detalla la comparación de algunos de los diferentes modelos de celdas disponibles en el mercado respecto a sus características físicas, químicas y eléctricas.

5.5. Reciclaje

En Costa Rica, la Ley N°8839 avala la posibilidad del reciclaje como forma de tratamiento para la valorización de los residuos. Sin embargo, se establece que este proceso se debe dar después de hacer sometido a reuso los residuos que presenten las condiciones para tal fin. En el caso de las LIBs de los VE, una vez sometidas a diagnóstico y determinado su estado de salud, aquellas que no puedan ser destinadas para extender su periodo de vida en otra actividad, podrán ser enviadas a valorización mediante reciclaje.

De acuerdo con los expertos académicos tanto en temas de ambiente como los especialistas en baterías, así como el sector gobierno entrevistados, un 91 % consideran que sí es una posibilidad desarrollar un mercado de reciclaje para las LIBs que paulatinamente van a ir comenzando a integrar la corriente de residuos como se muestra en la Fig. 22.

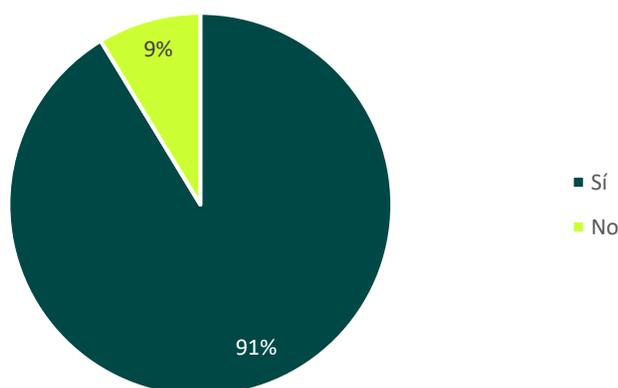


Fig. 22. Posibilidad de desarrollo de reciclaje en Costa Rica según los expertos académicos y del sector gobierno entrevistados

Sin embargo, para el desarrollo del proceso de reciclaje se deben tomar en cuenta aspectos relacionados como la rentabilidad del proceso, así como el hecho de que en el país existe solo una empresa que abarca este mercado, pero enfocado en el LIBs de menor tamaño y capacidad de almacenamiento que provienen de otros RAEE como las computadoras y los teléfonos celulares. También resulta importante fortalecer la vigilancia

y el marco legal para garantizar la adecuada gestión de los residuos para los gestores autorizados para llevar a cabo el proceso, que se muestran en la Fig. 23.

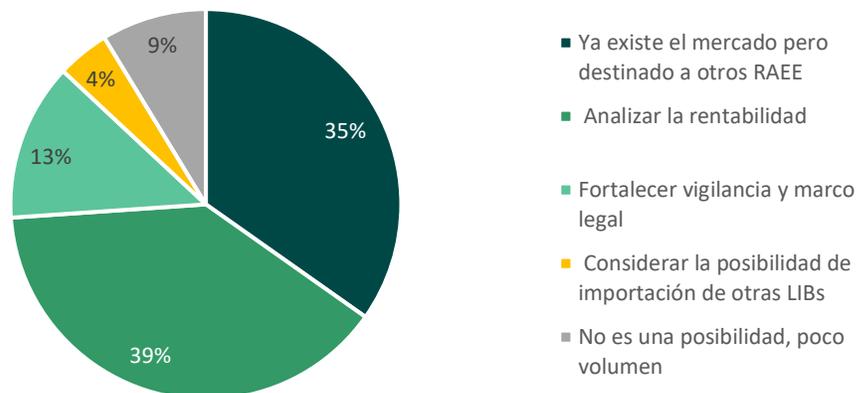


Fig. 23. Aspectos para considerar según los expertos académicos y del sector gobierno entrevistados en torno al proceso de reciclaje de LIBs en Costa Rica

El 9 % restante de los entrevistados de ambos sectores consideran que no es una posibilidad debido al volumen de residuos de LIBs provenientes de VE que eventualmente se generarán en el país. De igual manera, consideran que en Costa Rica no tiene un volumen que permita que el proceso sea rentable; este argumento coincide con los resultados obtenidos por [30] en donde se concluye que el país no cuenta con la cantidad de residuos de LIBs necesarios.

Tomando en cuenta las barreras o límites a superar actualmente, se debe considerar la posibilidad de desarrollo del reciclaje de las LIBs de manera conjunta a la gestión de las LIBs de otros RAEE que se generan en el país, ya que son este esto contribuiría a aumentar el volumen y mejorar el aspecto de rentabilidad del proceso [36].

Además, a este volumen se le podría sumar el de las LIBs generadas en la región Centroamericana asociadas al sector de movilidad eléctrica según el uso de tasas de crecimiento estimadas de importaciones por código arancelario para vehículos con baterías de ion-litio que se muestran en la Fig. 24, en donde se observa que estas estimaciones presentan un comportamiento exponencial [30].

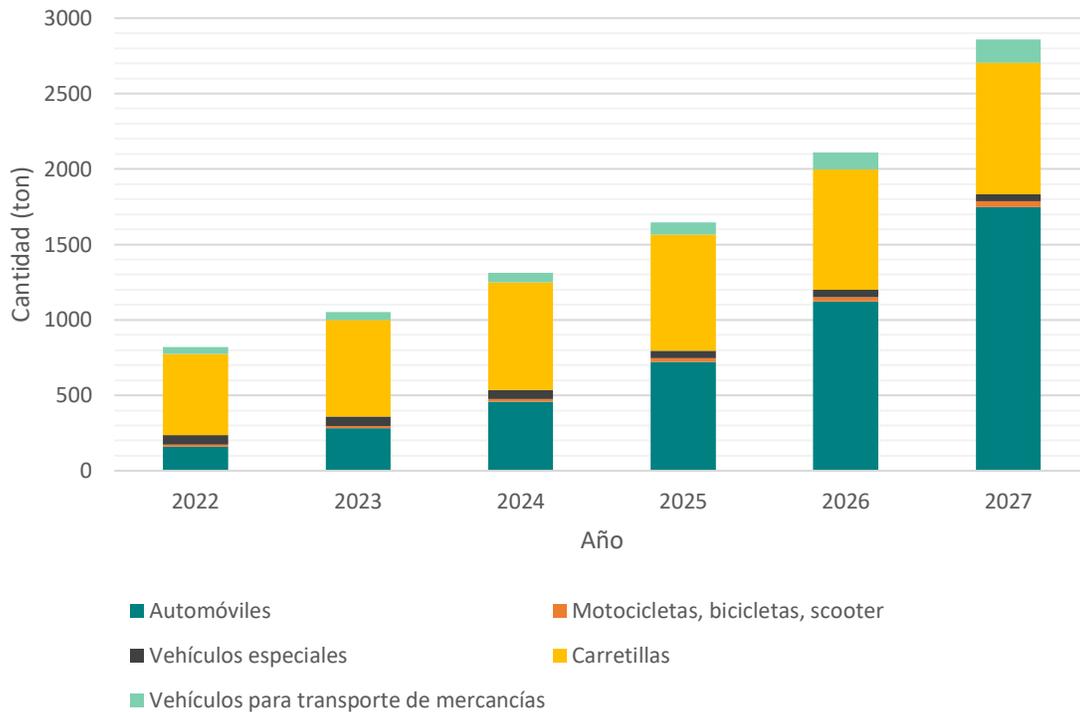


Fig. 24. Proyección de generación de LIBs asociadas al sector movilidad en Centroamérica para el periodo 2022-2027. Basado en [30]

De acuerdo con la Ley N°8839, en Costa Rica está prohibido la importación y el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos, radioactivos y bioinfecciosos de acuerdo con el artículo 39. Las LIBs no entran en estas categorías de acuerdo con la clasificación actual de estos residuos en el país. En el artículo 40 se establecen las exenciones para la importación de residuos y las condiciones bajo las cuales se podría permitir esta actividad. A continuación, se detallan las condiciones [20]:

1. Promover el uso de tecnologías ambientalmente adecuadas
2. Importación bajo protocolos que garanticen adecuado seguimiento y control
3. Destino final no puede ser disposición final
4. Criterio técnico aprobado por la Secretaría para la Gestión Racional de Sustancias
5. El residuo debe ser fuente de materia prima para otros productos
6. Contar con procedimientos adecuados para transporte en el territorio nacional

7. Cumplir con las condiciones correspondientes según el reglamento de la Ley N°8839

Al considerar los residuos de la región aunados a los generados dentro del territorio nacional se observa en la Fig. 25 que el volumen de baterías generadas a partir del sector de movilidad aumenta a más del doble anual para las proyecciones realizadas durante el periodo 2022-2027, presentando un comportamiento con tendencia de crecimiento exponencial.

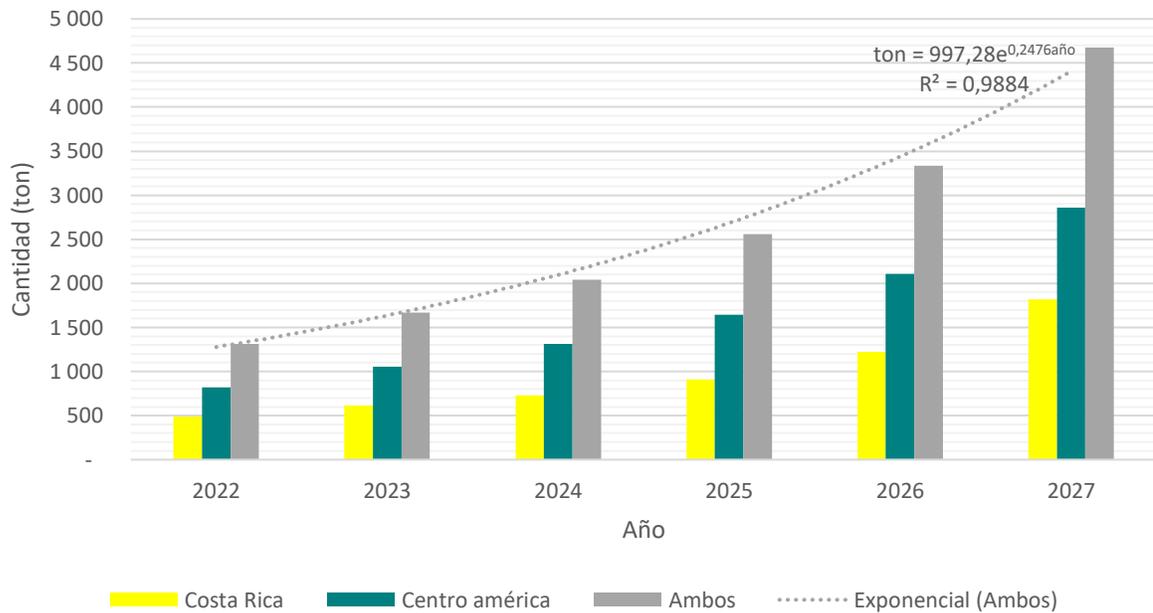


Fig. 25. Comparación de la proyección de generación de LIBs asociadas al sector movilidad en Costa Rica y Centroamérica para el periodo 2022-2027. [30]

En Costa Rica, el decreto ejecutivo N°42489 permite la importación de repuestos para VE y partes de centros de recarga al país a partir del cual también se podría aumentar el volumen de residuos futuros para valorización, mediante el ingreso de LIBs como repuestos que eventualmente podrán ser sometidos a reciclaje [8] [38].

6. PROPUESTA

Es importante considerar las capacidades técnicas (personal capacitado y equipo) con las que cuenta el país y priorizar la formación integral y el desarrollo de competencias que permitan ejecutar los programas para el manejo de residuos de las baterías de manera conjunta con el sector privado, priorizando las oportunidades de reúso y reciclaje según el principio de jerarquización establecido en la Ley para la Gestión Integral de Residuos N°8839.

De acuerdo con el marco legal nacional competente al manejo de residuos, las propuestas de gestión integral tomadas en el contexto internacional, las capacidades técnicas y de mercado existentes en Costa Rica, el ciclo de vida de las baterías, así como las etapas de este que tienen lugar dentro del país van desde el uso primario en el VE (puede ingresar como un componente del vehículo o eventualmente como repuesto), hasta la obtención de *black mass* posterior al proceso de valorización (reciclaje). Se propone el esquema de la Fig. 26 para el manejo integral de las LIBs.

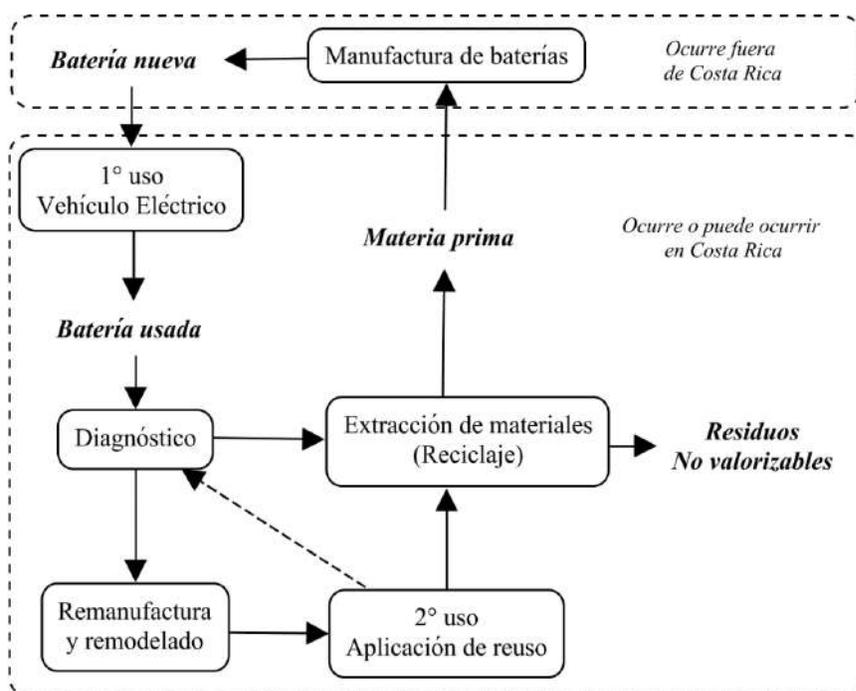


Fig. 26. Etapas del procesamiento de las LIBs

6.1. Diagnóstico

Esta etapa es determinante para definir el destino de la batería y conocer si es posible extender la vida de la unidad mediante reuso. Para ello es importante regular y supervisar el sector comercial destinado a esta actividad, procurando que las personas que laboren en esta actividad se encuentren capacitadas para trabajos relacionados con altos voltajes y establecimiento de sistemas libres de corriente. Además, se sugiere seguir la clasificación del personal en los tres niveles definidos en la TABLA 3 (Nivel de capacitación del personal), de acuerdo con las actividades que desempeñe cada colaborador:

1. Actividades que no involucran electricidad
2. Establecer condiciones libres de voltaje o actividades electrotécnicas en un estado libre de voltaje
3. Condiciones en presencia de voltaje y/o en cercanía de partes activas que se pueden tocar

Para la manipulación de las LIBs se debe contar con los equipos adecuados para las operaciones asociadas al trabajo con la batería, así como equipos de protección personal respectivos para los colaboradores, como:

- Grúas, montacargas y equipo para levantar baterías (en caso de ser necesario)
- Guantes dieléctricos con clasificación clase 0
- Mantas aislantes
- Extintores
- Botiquín de primeros auxilios (con desfibrilador ¹)
- Medidores de voltaje
- Cajas y materiales aislantes
- Pértigas de salvamento eléctrico
- Cualquier otro requerido para llevar a cabo el proceso de diagnóstico

¹ Se sugiere que contenga un Desfibrilador Externo Automático (DEA) para que el área de trabajo sea un área cardio protegida

Para el proceso de diagnóstico se pueden seguir los lineamientos propuestos por USABC, en su versión más actualizada, que corresponde a la 3.1 del año 2020 (considerar posibles actualizaciones posteriores). Para ello se consideran las siguientes pruebas (ver detalle en TABLA 2 Pruebas para diagnóstico del estado de salud de la batería según USABC).

- | | |
|---|------------------------|
| 1. Capacidad estática | 4. Potencia máxima |
| 2. Carga de alta tasa | 5. Autodescarga |
| 3. Caracterización de potencia de pulso híbrido | 6. Rendimiento térmico |
| | 7. Ciclo de vida |

Para establecer el proceso de diagnóstico se deben considerar también la información aportada por otras entidades como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (siglas en inglés IEEE) y considerar las actualizaciones en el tema que puedan surgir con el tiempo.

Además, es importante que el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) en conjunto con el sector académico, procuren la elaboración de normativa para el proceso de diagnóstico de las LIBs, permitiendo de esta forma establecer un proceso estandarizado de diagnóstico que contemple las pruebas requeridas, condiciones mínimas de salud requeridas para considerar la posibilidad de reúso de la batería; así como aspectos de capacitación técnica, condiciones y equipos de seguridad. De esta forma se podría estandarizar la certificación del estado de salud de la batería.

También se deben considerar las observaciones y sugerencias del Consejo de Seguridad Ocupacional del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, ya que es el órgano técnico costarricense rector en el área de salud ocupacional, y además se encuentra encargado de dirigir y diseñar técnicamente los aspectos normativos y de planificación de en este ámbito.

6.2. Almacenamiento

Las condiciones de almacenamiento de las LIBs aplican para todas las áreas en donde se vayan a resguardar temporalmente las baterías, incluyendo aquellas unidades que se vayan a destinar a diagnóstico, reúso, reciclaje y exportación; principalmente previo a ser sometidas al proceso de descarga profunda. Los requerimientos para los espacios destinados a almacenar baterías van a depender de la cantidad de unidades que se deban almacenar, como se presenta en la TABLA 4 (Condiciones de almacenamiento de las LIBs). Se realiza la clasificación en tres categorías:

1. Bajo: 1-5 baterías
2. Medio: 6-20 baterías
3. Alto: >20 baterías

Sin embargo, existen condiciones mínimas de almacenamiento que se deben cumplir independientemente de la cantidad de baterías que se requiere almacenar, esto debido a las características del LIBs, las condiciones son las siguientes:

- No mezclar baterías nuevas con baterías usadas
- El área de almacenamiento debe estar separada de otras áreas y rotulada
- Las baterías se almacenan descargadas
- Debe haber detectores de humo y extintores
- Condiciones libres de humedad y con buena ventilación
- El acceso al espacio de almacenamiento debe ser controlado y restringido

6.3. Remodelado y remanufactura

Las LIBs provenientes del sector de transporte están diseñadas para satisfacer las necesidades energéticas operativas de los VE que las contienen, debido a ello aquellas LIBs que vayan a ser destinadas a reúso deben ser sometidas a los procesos de remodelación y remanufactura para poder adaptar estas unidades a las condiciones requeridas por otras actividades. Estos procesos incluyen aquellos cambios requeridos tanto a nivel del software que administra la carga de la batería, como de la parte física de la batería.

Los procesos a los que se vaya a someter la batería, así como los equipos requeridos, van a depender de la actividad a la que se van a destinar sus módulos o celdas, considerando aspectos como la potencia requerida, densidad energética de la celda, actividad o lugar de destino. Algunos de los procesos pueden ser:

1. Desensamblaje de la batería
2. Ensamblaje de una nueva batería
3. Diseño acorde a la actividad de destino
4. Etapas de prototipado
5. Ajuste a nivel del software que administra la carga
6. Cambio de componentes eléctricos

Estos procesos se deben ejecutar siempre bajo la premisa de que se está trabajando en presencia de unidades con voltaje y/o en cercanía de partes activas que se pueden tocar y generar accidentes por la energía eléctrica almacenada. De manera preventiva, se deben emplear los equipos de protección personal descritos previamente en el apartado 6.1. Diagnóstico, y a su vez cumplir con las recomendaciones y lineamientos para el almacenamiento de LIBs expuestos en la sección anterior 6.2. Almacenamiento.

Actualmente, no existe un proceso estandarizado sobre remodelado y remanufactura de LIBs (batería completa, sus módulos o celdas). Los costos estimados para el proceso de remodelado y remanufactura dependen de las herramientas y equipos requeridos, fabricante de la batería, instalaciones, costos de mano de obra, así como del nivel de intervención que requiera la batería de acuerdo con la actividad a la que va a ser destinada, por ende, se deben estimar para cada caso. Por ejemplo, el nivel de intervención de una batería para su uso estacionario en una casa o empresa no es igual al requerido para almacenamiento en actividades móviles como la conversión de vehículos de combustión a VE debido a aspectos como la potencia requerida y el diseño.

6.4. Reúso

Se debe incentivar el desarrollo del mercado de reúso de las LIBs (módulos y celdas) que se encuentren en condiciones óptimas para ser destinada a este fin, de acuerdo con el diagnóstico previo ejecutado a la unidad. Además, para ello la batería deberá ser sometida a los procesos de remanufacturado y remodelado necesarios para que pueda ser empleada en otra actividad. Aquellas unidades que de acuerdo con el diagnóstico no puedan ser reusadas o que posterior al reúso ya no puedan ser empleadas en otra actividad deberán ser enviadas a valorización de sus componentes, es decir reciclaje, priorizando de esta forma la recuperación de los materiales que la componen.

Para ello es importante considerar las características de las LIBs de los VE del parque nacional y determinar aquellas actividades para las cuáles se podrían destinar, considerando que las baterías (módulos o celdas, depende de la energía que se requiera) con mayor densidad de energía como las de composición NMC se pueden destinar a actividades no estacionarias. Se propone priorizar las investigaciones dirigidas a la conversión de vehículos de combustión a VE con el fin de contribuir a la descarbonización de otras áreas del sector transporte.

Otra área de posible desarrollo de investigación en actividades de reúso es el almacenamiento estacionario como baterías recargables de uso doméstico o industrial. Esta actividad podría permitir al usuario (persona o empresa) hacer reducir su factura eléctrica mediante un cambio en la forma en que administra su consumo de energía mediante el uso de una batería que pueda ser cargada en los periodos donde el costo de la energía es menor (periodos noche o valle) y hacer uso de la energía almacenada en aquellos periodos en donde el costo es mayor (periodo punta). En la TABLA 13 se comparan los costos promedio de kWh para los tres periodos horarios de las tarifas residencial e industrial en Costa Rica.

TABLA 13
Promedio² de tarifa residencial e industrial horaria 2022

Periodo	Horario	Promedio costo kWh	
		Residencial	Industrial (T-MT)
Punta	10:01-12:30	₡ 158,35	₡ 68,48
	17:31-20:00		
Noche	20:01-6:00	₡ 51,27	₡ 32,91
Valle	6:01-10:00		
	12:31-17:30	₡ 85,18	₡ 41,56

Nota: basado en datos de: [39]

Se debe considerar que no todos los distribuidores de energía eléctrica en el país poseen tarifas horarias para todos los sectores (industrias, comercios, hogares); sin embargo, esto no limita la posibilidad de almacenamiento estacionario y el aprovechamiento de otros sistemas de generación de energía eléctrica, como los sistemas fotovoltaicos que pueden ser beneficiosas para el país y el usuario. De esta forma se podría almacenar energía obtenida mediante paneles solares durante el día para ser utilizada posteriormente en otras actividades dentro del hogar o la empresa; entre ellas la carga de VE. Asimismo, el usuario (persona o empresa) podría reducir su consumo energético de la red eléctrica nacional mediante el aprovechamiento de la energía eléctrica que está produciendo y posteriormente almacenado en las baterías para uso en otros horarios en donde no se está generando electricidad.

Dentro de estas investigaciones se debe considerar, además de las características de las baterías, los costos de la energía en el país, costo del combustible, oportunidades de mercado, transporte, beneficios ambientales, la formación de personal capacitado y el desarrollo instalaciones equipadas para poder llevar a cabo las adaptaciones requeridas para destinar la batería a reuso.

² Se consideraron todas las tarifas vigentes de las distribuidoras que ofrecen tarifas horarias residenciales y T-MT

6.5. Reciclaje

Se debe considerar que la valorización de la batería no va a suceder al 100%, es decir que no todos sus componentes tienen potencial para ser valorizados y, por ende, algunos deberán ser gestionados mediante procesos diferentes y/o en un momento dado ser destinados para disposición final. Sin embargo, la propuesta gira entorno a la valorización de todo componente de la batería con potencial para ser destinado a este fin, incentivando así el desarrollo de nuevos mercados y procesos en el país.

De acuerdo con las condiciones actuales del país, el reciclaje de las LIBs de los VE se puede llevar a cabo dentro del proceso de reciclaje de LIBs de RAEE (como las baterías de computadoras y celulares) que se efectúa en el país aprovechando la infraestructura y equipos que ya existen, debido a que desarrollar un proceso industrial independiente y exclusivo para las LIBs de VE no sería rentable en un corto plazo ya que el volumen nacional de este residuo es bajo.

Sin embargo, esta limitante se podría eliminar mediante la importación de LIBs de VE de otras partes de la región centroamericana que requieren ser valorizadas; esto a su vez permitiría brindar una opción de gestión integral de estos residuos no solo a Costa Rica sino también a otros países que no cuentan con las capacidades de realizar este proceso. La importación de LIBs agotadas desde otras latitudes se puede gestionar mediante el artículo 40 (Exenciones para la importación de residuos), inciso a) de la Ley N°8839; en este se plantea la posibilidad de importación de residuos para promover el establecimiento de tecnologías para el tratamiento de residuos similares a los generados en el país y que de esta forma se pueda llevar a cabo la gestión responsable de los residuos nacionales e importados.

Se debe considerar el fomento al desarrollo de capacidades técnicas y de instalaciones empresariales nivel nacional para enfrentar el aumento en la generación de residuos que van a requerir ser tratados a futuro, así como los costos asociados a la ejecución de este proceso en el país. Los costos asociados al reciclaje van a depender de diferentes factores, ubicación, transporte, mano de obra, dificultad de desensamblaje, costos de energía, composición de la batería, así como el proceso de reciclaje que se emplee, así como las etapas que se abarquen, es decir, si el proceso se desarrolla hasta la obtención del *black*

mass o si se llevan a cabo otras etapas del proceso que permiten obtener finalmente los materiales finales.

En otras partes del mundo el proceso se realiza para LIBs de VE se realiza a mayor profundidad, hasta obtener diferentes materiales de valor para nuevos procesos de manufactura. Al comparar el reciclaje de LIBs de VE en diferentes latitudes (China, Corea del Sur, Estados Unidos, Bélgica, Reino Unido) el proceso de reciclaje hasta la obtención de los materiales de valor mediante reciclaje directo, hidrometalurgia y pirometalurgia de LIBs de diferente composición química, se observa que la relación costo-beneficio de los diferentes procesos de pueden variar en el rango entre -21,43 \$/kWh y +21,91\$/kWh [40].

Las LIBs con composición NCA mediante reciclaje directo son las que presentan mayor rentabilidad en los 5 países anteriores, ubicándose en el rango de +10,00 \$/kWh y +20,00 \$/kWh; mientras que las baterías LMO son las de menor rentabilidad (-0,00 \$/kWh y +8,00 \$/kWh), otras composiciones como NMC y LFP también son rentables mediante reciclaje directo. Para el caso de las técnicas de hidrometalurgia y pirometalurgia, estas son rentables solamente para el caso de estudio de China y solo para las composiciones NCA y NMC. Además, el rubro que aumenta los costos principalmente es el transporte de las baterías [40]. Es un aspecto para considerar en el fomento de LIBs que ingresan al país por el valor económico agregado que presenta el residuo de algunas de ellas; sin embargo, se deben considerar los aspectos económicos y ambientales los materiales empleados en cada una de las composiciones químicas.

Actualmente en el país el proceso de reciclaje de LIBs se lleva a cabo hasta la obtención del *black mass*, destacando que este proceso se ejecuta para LIBs de diferentes RAEE. En Costa Rica no hay un proceso de reciclaje exclusivo para LIBs de VE.

Se debe considerar el precio internacional de los metales, que está en constante fluctuación por los conflictos militares y guerras económicas en el mundo, como se observa en la Fig. 27. Esta situación, podría influir en el tema de la rentabilidad del proceso del reciclaje debido a que el precio de los materiales recuperados presenta una tendencia de crecimiento en el mercado internacional para la manufactura de nuevos productos.



Fig. 27. Precio de algunos metales y combustibles para el periodo 2000-2022 [40]

Además, se debe considerar que el precio del litio, también se encuentra con una tendencia de crecimiento que se ha acentuado en el último año. Durante el año 2020, el precio de la tonelada de carbonato de litio en China no alcanzaba los 50 000 CNY; sin embargo, al cierre del 2021 el precio de este compuesto rondaba los 100 000 CNY y para mitad del 2022 su valor casi alcanza los 500 000 CNY [41].

6.6. Actores y responsabilidades

Es importante tener en cuenta que la gestión integral de las LIBs es el resultado del trabajo interinstitucional, que integra a diferentes entidades gubernamentales, rectoras en temas como: residuos, energía y formación profesional. En la TABLA 14 se detallan los pasos por seguir sugeridos para llevar a cabo la gestión de las LIBs provenientes del parque vehicular eléctrico costarricense y las entidades responsables de su ejecución.

TABLA 14
Propuesta para la gestión integral de las LIBs de los VE

Actividad	Marco Legal	Ente encargado
1. Declarar las LIBs como residuos de manejo especial (eliminar la ambigüedad actual en la clasificación del residuo en la legislación)	Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial N° 38272-S: artículos 5 y 6	Ministerio de Salud
2. Mantener registros actualizados de todos los VE (individuales y colectivos) que ingresan al país; en donde se incluya la información correspondiente a la batería que contiene.	Ley Incentivos y promoción para el transporte eléctrico, N° 9518: artículo 21	Ministerio de Hacienda Ministerio de Ambiente y Energía

Actividad	Marco Legal	Ente encargado
3. Exigir el cumplimiento de la Responsabilidad extendida al productor (REP) (residuos prioritarios y residuos de manejo especial)	-Ley para la Gestión Integral de Residuos, No. 8839: capítulo IV -Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial N° 38272-S: artículos 2 y 4	Ministerio de Salud
4. Establecer las Unidades de Cumplimiento correspondientes	-Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial N° 38272-S: capítulo IV	Ministerio de Salud
5. Establecer metas de recuperación de LIBs de acuerdo con la cantidad de baterías que ingresan al país	-Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial N° 38272-S: capítulo III	Ministerio de Salud
6. Fiscalizar el cumplimiento de las metas de recolección de las LIBs y actualizar de forma periódica las metas de acuerdo con la realidad del país	-Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial N° 38272-S: capítulo III	Ministerio de Salud
7. Fortalecer el sistema de recolección de residuos para poder captar las LIBs de manera oportuna para prevenir su deterioro y eventuales riesgos para el ambiente y la salud (principalmente fuera de la GAM)	-Ley para la Gestión Integral de Residuos, No. 8839: artículos 25, 27 y 45 -Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial N° 38272-S: artículos 18 y 19	Ministerio de Salud

Actividad	Marco Legal	Ente encargado
8. Informar al usuario sobre su responsabilidad e importancia de su participación activa y consciente en la gestión integral de las baterías de sus vehículos	-Ley para la Gestión Integral de Residuos, No. 8839: artículo 43	Ministerio de Salud
9. Fomentar el desarrollo de competencias técnicas para efectuar la remanufactura y remodelación de las LIBs que van a destinarse a reuso	-Ley Orgánica del Instituto Nacional de Aprendizaje: artículo 2	Instituto Nacional de Aprendizaje (INA)
10. Fomentar la investigación respecto a las posibilidades de reuso de las LIBs en actividades de almacenamiento de energía en el territorio nacional	-Reglamento Orgánico del Ministerio de Ambiente y Energía N° 35669-MINAET: artículo 49	Ministerio de Ambiente y Energía (Dirección de Energía)
11. Determinar las condiciones de salud de la batería requeridas para definir si debe ser destinada a reuso o a reciclaje.	---	Ministerio de Ambiente y Energía Ministerio de Salud Sector académico
12. Desarrollar la reglamentación correspondiente para el reuso de las LIBs	---	Ministerio de Ambiente y Energía Ministerio de Salud INTECO

6.7. Alternativa: exportación

Es importante tomar en cuenta la posibilidad de exportación del residuo, si eventualmente en el país no hay posibilidades para realizar la valorización ya sea por temas de rentabilidad o por falta de la tecnología adecuada para llevar a cabo el proceso de forma correcta. La exportación puede suceder como una etapa alternativa al reciclaje de la batería, en donde las LIBs agotadas se envían para ser recicladas en otras latitudes. La exportación no es excluyente de las actividades de reúso de las baterías que se encuentren en un estado de salud que así lo permita según lo determinado por el análisis efectuado. No se debería promover la exportación de LIBs que se encuentran en condiciones para reúso.

Esta actividad en el país se encuentra sujeta al Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, según la Ley 8839, Capítulo II Movimientos Transfronterizos de Residuos. Si bien la exportación del residuo es una práctica que actualmente se ejecuta en el país para el manejo de otros residuos, se debe considerar que para el caso de las LIBs de los VE la exportación del residuo reduce las posibilidades de desarrollo de nuevos mercados entorno al reúso y reciclaje en el país. Esta opción se puede considerar ya que se encuentra dentro de las posibilidades avaladas por el marco jurídico costarricense para el manejo de residuos.

7. CONCLUSIONES

El Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030 no contempla acciones, medidas o herramientas para abordar la gestión integral de los residuos de las LIBs de los VE que están ingresando al país desde el 2010. Esta es una problemática nueva debido a que el ingreso de los VE al país es reciente y aún no se han comenzado a generar residuos de las baterías agotadas. Considerando el crecimiento exponencial del mercado, estudiado en este trabajo, es necesario establecer una estrategia preventiva para la gestión de este tipo de residuo cuánto antes.

Hasta muy recientemente en el país no existía ninguna claridad sobre qué ruta seguirían las baterías de los VE, sin embargo, es un avance positivo la publicación reciente de la *Hoja de ruta para la gestión eficiente y ambiental de las baterías de los vehículos eléctricos en Costa Rica*, el cual se sitúa como documento precursor para la gestión integral de las LIBs de los VE e involucra aspectos referentes al manejo de estos residuos empleando como marco de referencia las acciones en esta área llevadas a cabo por otros países, desde el ingreso de las baterías al territorio hasta su salida hacia la corriente de residuos, y considerando, la capacidad de Costa Rica para gestionar estos residuos.

Costa Rica actualmente no cuenta con la capacidad para realizar la gestión integral de las LIBs de los VE. Primeramente, se debe aclarar la ambigüedad en la clasificación de las LIBs en la legislación nacional correspondiente a residuos, específicamente en el reglamento de residuos de manejo especial. Sin embargo, de acuerdo con el marco legal vigente para el manejo de residuos, la experiencia existente en el país con respecto al manejo de residuos similares (LIBs de RAEE) y la presencia de un sector de gestores de residuos identificado, el país cuenta potencialmente con las condiciones para desarrollar las capacidades técnicas, operativas y logísticas necesarias para realizar la gestión integral de las LIBs de los VE.

La LIBs de los VE del parque nacional eventualmente podrían destinarse a reúso de acuerdo con su capacidad de carga residual al finalizar el periodo de vida útil dentro del vehículo. Esto de acuerdo con el promedio de distancia recorrida por los usuarios de VE en el país, ya que el periodo de vida estimado para las baterías se situaría entre 9,2 años y 38,5

años para 1000 ciclos de carga, lo cual excede al periodo de vida promedio de un automóvil en el país (16 años). No obstante, las posibilidades de reuso de las LIBs están sujetas al estado de salud de la unidad al momento de ser retirada del VE, y este a su vez depende de las condiciones de uso por parte del usuario. Además, es importante considerar que los VE disponibles en el mercado cada vez cuentan con mayor autonomía por ciclo de carga. Sin embargo, se debe considerar que los costos e impactos económicos asociados al proceso de reuso de las baterías en el país se desconocen debido a que este proceso es nuevo en el mercado.

Se debe incentivar el desarrollo del sector comercial y académico entorno al proceso de reuso de las LIBs en actividades que pueden abarcar desde el almacenamiento estacionario de energía para sistemas fotovoltaicos, hasta la conversión de vehículos de combustión interna a VE, lo cual contribuye a continuar con la transformación de matriz vehicular costarricense, así como la reducción en las emisiones asociadas a este sector. Considerando que debe hacerse una evaluación experta de las LIBs que se retiren de los VE para determinar si la condición en la que se encuentran les permite ser destinadas a una segunda vida.

Respecto a las posibilidades del desarrollo del proceso de reciclaje y un mercado entorno solamente al reciclaje de las LIBs de los VE del parque vehicular nacional, se determina que de acuerdo con las estimaciones de generación anual hasta el año 2027, el proceso no es rentable debido a que el volumen de LIBs no es suficiente, ya que se proyectan 1819 ton generadas en el país y 2860 ton en el resto de Centroamérica. Sin embargo, la posibilidad de importar LIBs de la Región Centroamericana e integrar al proceso LIBs de otros RAEE contribuiría a mejorar el tema de la rentabilidad para considerar el desarrollo de este mercado en el país a futuro.

De manera general se observa que tanto los sector académico, gobierno y empresarial tienen importantes retos con soluciones aún no del todo definidas o dirigidas por los planes reguladores para abordar la problemática correspondiente al manejo de las LIBs de la matriz vehicular nacional. Teniendo como experiencia los impactos ocasionados por otro tipo de residuos que han sido y son desatendidos en Costa Rica por la falta de regulación y también de concertación de los actores involucrados en el procesamiento de

un residuo, es prioritario que a la par del incentivo de cambio impulsado por el gobierno para la transformación de la matriz vehicular hacia el sector eléctrico, se asuman los costos integrales de un nuevo modelo de energía y transporte; incluyendo aquellos relacionados a las etapas posteriores al periodo de vida útil del vehículo.

8. RECOMENDACIONES

Se debe fomentar el desarrollo de proyectos académicos y comerciales que permitan el desarrollo del mercado para reuso de LIBs enfocado a almacenamiento estacionario y conversión vehicular de combustión interna a electricidad de vehículos de transporte individual tanto en la GAM como en las zonas rurales del país, lo cual permitiría continuar con la transformación de la matriz vehicular costarricense hacia el sector eléctrico.

De igual forma, es importante realizar estudios costo-beneficio sobre las posibilidades de reuso (incluyendo el proceso previo de remanufactura y remodelado) y reciclaje de acuerdo con las características del país para obtener datos nacionales sobre rentabilidad, considerando los modelos de VE que hay en el país (potencia, composición y fabricante de la batería), crecimiento de la flota de vehicular eléctrica y otros costos asociados a mano de obra, transporte, costo de la energía, legislación nacional impacto social y ambiental.

Además, es importante involucrar al usuario y a las asociaciones de usuarios de VE del país en la formulación de los planes de manejo, debido a que son actores importantes en el tema y de acuerdo con la legislación nacional tienen obligaciones en la gestión integral de los residuos.

9. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Ambiente y Energía, “Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030”, 2018
- [2] Ministerio de Ambiente y Energía, “Vehículos eléctricos en Costa Rica”, 2022. [Online]. Disponible: <https://energia.minae.go.cr/?p=5634>. [Acceso: 2 Julio, 2022]
- [3] X. Zeng, J. Li, N. Singh, “Recycling of spent lithium-ion battery: a critical review”, *Environmental Science and Technology*, vol.10, no.10, pp.1129-1165, 2014
- [4] B. Manz, C. Lienemann; N. Soldan, “Introduction into Batteries” present at Capacity Development EV Batteries Training, San José, Costa Rica, 2022
- [5] L. Lu, H. Xuebing, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, “A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles”, *Journal of Power Sources*, vol. 226, pp. 272-288, 2013
- [6] J. Feng, P. Kvam, Y. Tang, “Remaining useful lifetime prediction based on the damage-maker bivariate degradation model: A case of study on lithium-ion batteries used in electric vehicles” *Engineering Failure Analysis*, vol.70, pp.323-342, 2016
- [7] A. Carnovale, X. Li, “A modeling and experimental study of capacity fade for lithium-ion batteries”, *Energy and AI*, vol. 2, 2020
- [8] R. Urcuyo, D. González, A. Fernández, P. Madrigal, A. Pérez, V. Reyes, V. Vega, “Elaboración de una Hoja de ruta para la gestión eficiente y ambiental de las baterías de los vehículos eléctricos en Costa Rica” Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química CELEQ, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2022
- [9] A. Carnovale, X. Li, “A modeling and experimental study of capacity fade for lithium-ion batteries”, *Energy and AI*, vol. 2, 2020
- [10] E. Hossain, D. Murtaugh, J. Mody, H. M. R. Faruque, S.H Sunny, N. Mohammad, “A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing

Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies” *IEEE Access*, vol. 7, pp.73215-73251, 2019

[11] S. Zhang, B. Zhai, X. Guo, K. Wang, N. Peng, X. Zhang, “Synchronous estimation of state of health and remaining useful lifetime for lithium-ion battery using the incremental capacity and artificial neural networks”, *Journal of Energy Storage*, vol. 26, 2019

[12] J. Quirós, L. Victor, L. Ochoa, “Electric Vehicles in Latin America: Slowly but Surely Toward a Clean Transport”, *IEEE Electrification Magazine*, vol.7, no. 2, Octubre, pp. 22-32, 2019

[13] Presidencia de la República de Costa Rica, “Costa Rica alcanza menor uso de hidrocarburos para generar electricidad en 65 años”, Comunicado, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2021/12/costa-rica-alcanza-menor-uso-de-hidrocarburos-para-generar-electricidad-en-65-anos/>. [Acceso: 11 Julio, 2022]

[14] U. Bjørn, M. Araya, “Electrifying emerging markets: the case of Costa Rica”, EVS30 Symposium, 2019, pp. 9-11

[15] Asamblea Legislativa, “Ley Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico N° 9518”, *La Gaceta*, 2018

[16] L. Víctor, J. Angulo, R. Bejarano, D. Fuentes, L. Ruíz, J. Martínez, J. Quirós, “Strategic Location of EV Fast Charging Stations: The Real Case of Costa Rica”, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, 2019

[17] G. Michelini, R. Morales, R. Cunha, J. Costa, A. Ometto, “From Linear to Circular Economy: PSS Conducting the Transition”, *Procedia CIRP*, 2017, pp.2-6

[18] B. Manz, C. Lienemann; N. Soldan, “Battery Re-X” present at Capacity Development EV Batteries Training, San José, Costa Rica, 2022

- [19] E. Mossali, N. Picone, L. Gentilini, O. Rodríguez, J. Pérez, M. Colledani, “Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments”, *Journal of Environmental Management*, vol. 264, pp. 1-12, 2020
- [20] United States Advanced Battery Consortium, “Battery Test Manual for Electric Vehicles”, Vehicle Technologies Program, U.S Department of Energy, 2020
- [21] Asamblea Legislativa, “Ley para la Gestión Integral de Residuos, N°8839”, *La Gaceta*, 2010
- [22] K. Richa, C. Babbit, N. Nenadic, G. Gaustad, “Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, pp.66-81, 2017
- [23] J. Heelan, E. Gratz, Z. Zheng, Q. Wang, M. Chen, D. Apelian, Y. Wang, “Current and prospective Li-ion battery recycling and recovery processes”, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 2016
- [24] L. Gaines, “The future of automotive lithium-ion battery recycling: sustainable course”, *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 1-2, pp. 2-7, 2014
- [25] O. Velázquez, J. Valio, A. Santasolo, M. Reuter, R. Serna, “A critical review of lithium-ion battery recycling processes from a circular economy perspective”, *Batteries*, vol.5, no.68, Agosto, pp. 2-33, 2019
- [26] M. Ganter, B. Landi, C. Babbit, A. Anctil, “Cathode refunctionalization as a lithium-ion battery recycling alternative” *Journal of Power Sources*, vol. 256, pp. 274-280, 2014
- [27] B. Manz, C. Lienemann; N. Soldan, “Handling & Dismantling EV Batteries” present at Capacity Development EV Batteries Training, San José, Costa Rica, 2022
- [28] ASOMOVE, “Comparativa de Vehículos Eléctricos Puros (BEV's) en Costa Rica”. [Online]. Disponible: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1gvB_E2wr0WUHxsHFyAkCUwh-7TIxO9D7iwbYpigZKfw/edit#gid=0. [Acceso: 10 Julio, 2022]

- [29] ASOMOVE, “Información sobre modelos y precios de bicicletas y scooters eléctricas”. [Online]. Disponible: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1tT8IUgo6HJLkmYJfNvdYGfGkHxQoXz2sEA1JPPHB02w/edit#gid=0>. [Acceso: 10 Julio, 2022]
- [30] J. Domenech, R. Guillén, “Elaboración de un estudio sobre la existencia de baterías de ion-litio usadas en Costa Rica y América Central, que estarían disponibles para ser valorizadas”, GIZ, Proyecto de desarrollo Towards a secure and eco-friendly circular economy of lithium batteries, 2021
- [31] S. Rojas, “Entrevista directora ejecutiva Asociación Costarricense de Movilidad Eléctrica” (Junio 12, 2022)
- [32] Asamblea Legislativa, “Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial, Decreto N° 38272-S”, *La Gaceta*, 2014
- [33] Ministerio de Salud, "Listado de gestores de residuos aprobados", 2022. [Online]. Disponible: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/ministeriodesaludbk/index.php/informacion/gestores-de-residuos-ms> [Abril 20, 2022]
- [34] M. Kurdve, M. Zackrisson, M. Johansson, B. Ebin, U. Harlin, “Considerations when Modelling EV Battery Circularity Systems” *Batteries*, vol. 5, pp. 1-20, 2019
- [35] Riteve, "Anuario 2020", Departamento de Comunicación y Responsabilidad Social. 2020
- [36] Riteve, "Anuario 2021", Departamento de Comunicación y Responsabilidad Social. 2021
- [37] Fortech, " Nueva planta piloto para sistema de reciclaje de baterías de ion-litio", 2021. [Online]. Disponible: <https://fortech.cr/blog/nueva-planta-piloto-para-sistema-de-reciclaje-de-baterias-de-litio/#:~:text=Desde%20el%202019%2C%20Fortech%20se,uso%20generalizado%20de%20dispositivos%20recargables.> [Agosto 2, 2022]

- [38] Asamblea Legislativa, “Reglamento para la exoneración del impuesto sobre las ventas y del selectivo de consumo a los repuestos de vehículos eléctricos y exoneración del impuesto selectivo de consumo y del 1% sobre el valor aduanero para las partes y centros de recarga Ley N° 9518 N° 42489-MINAE-MOPT-H”, *La Gaceta*, 2020
- [39] Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, “Tarifas vigentes de electricidad”, 2022. [Online]. Disponible: <https://aresep.go.cr/electricidad/tarifas>. [Agosto 28, 2022]
- [40] Datos macro, “Materias primas”. [Online]. Disponible: <https://datosmacro.expansion.com/materias-primas>. [Setiembre 4, 2022]
- [41] Trading Economics, “Litio - Contrato De Futuros – Precios”. [Online]. Disponible: <https://es.tradingeconomics.com/commodity/lithium> [Setiembre 4, 2022]
- [42] L. Lander, T. Cleaver, M. Rajaeifar, E. Kendrick, J. Edge, G. Offer, “Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling” *iScience*, vol. 24, pp. 1-14, 2021
- [43] Evlithium, “CATL LiFePO4 Battery”. [Online]. Disponible: <https://www.evlithium.com/lifepo4-battery-news/475.html>. [Julio 24, 2022]
- [44] Panasonic Industry, “Lithium-ion Batteries: Models”. [Online]. Disponible: <https://industrial.panasonic.com/ww/products/pt/lithium-ion/models?op=search&series=ACA4002#model-list-search-results>. [Julio 24, 2022]
- [45] Ancoo, “BYD Lithium-ion Battery Cells”. [Online]. Disponible: <https://www.ancoo-battery.com/en/new/BYD.html>. [Julio 24, 2022]
- [46] Evlithium, “Samsung SDI94 Li Ion 3.7V 94AH NMC NCM Lithium Prismatic Battery”. [Online]. Disponible: <https://www.evlithium.com/hot-lithium-battery/845.html>. [Julio 24, 2022]
- [47] Wamtechnik, “Lithium-ion batteries (Li-Ion) of LG-Chem”. [Online]. Disponible: <https://wamtechnik.pl/en/products/lithium-technology/batteries-lithium-ion-li-ion/akumulatory-litowo-jonowe-li-ion-lg-chem/>. [Julio 24, 2022]

[48] Panasonic Industry, “Cylindrical Series”. [Online]. Disponible: <https://na.industrial.panasonic.com/products/batteries/rechargeable-batteries/lineup/lithium-ion/series/90729>. [Julio 24, 2022]

[49] Wamtechnik, “Lithium-ion batteries (Li-Ion) of Samsung”. [Online]. Disponible: <https://wamtechnik.pl/en/products/lithium-technology/batteries-lithium-ion-li-ion/batteries-lithium-ion-li-ion/>. [Julio 24, 2022]

[50] Electric has gone Audi, “Audi e-tron battery”. [Online]. Disponible: <https://electrichasgoneaudi.net/models/e-tron/drivetrain/battery/>. [Julio 24, 2022]

[51] Ancoo, “Samsung SDI Lithium-ion Battery Cells”. [Online]. Disponible: <https://www.ancoo-battery.com/en/new/SDI.html>. [Julio 24, 2022]

APÉNDICES

Apéndice 1. Perfil de las personas entrevistadas

TABLA 15
Perfil de las personas entrevistadas por sector

Sector	Nombre	Perfil
Ambiente	Luis Guillermo Valerio Pérez	Ingeniero Ambiental, consultor de medio ambiente y energía en Centro de investigación en Protección Ambiental
	Andrea Acuña Piedra	Ingeniera Ambiental, consultora ambiental
	Arturo Steinvorth Álvarez	Ingeniero Ambiental, especialidad en temas de electromovilidad en Costa Rica, Centro para la Sostenibilidad Urbana
	Sofía Cruz Godínez	Ingeniera Ambiental
ACADÉMICO	Roberto Urcuyo Solorzano	Investigador en Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ)
	Sergio Morales Hernández	Ingeniero en Electrónica. Coordinador del Laboratorio de Investigación en Vehículos Eléctricos (LIVE), y miembro fundador del Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab)
	Víctor Vega Garita	Investigador especialista en temas de la integración de energía solar fotovoltaica, almacenamiento de energías por medio de baterías, y energías renovables en general.
	Cindy Torres Quirós	Especialista en temas de energía en la UCR y miembro de la junta directiva de la CNFL
	Aramis Pérez Mora	Ingeniero Eléctrico especialista en baterías, investigador en el Laboratorio de Diagnóstico y Pronóstico de Fallas y el Centro de Energía de la Universidad de Chile, investigador en Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ)

Sector	Nombre	Perfil	
COMERCIAL	Importadores de VE	Juan Enrique Soto Morales	Jefe de Servicio del Taller Central Grupo Q
		Carlos Aguilar	Director de la Asociación de Importadores de Vehículos y Maquinaria (AIVEMA)
		Pedro Dobles	Gerente General de CoriMotorts de Centroamérica S.A.
		Max Soto	Gerente de Servicio VEINSA Motors
		Stewar Fuentes	Técnico automotriz de Autostar Vehículos
		Ahory Quintanilla	Propietario Motorcycle Zone CR
		Luis Diego Acuña	Gerente de Desarrollo de nuevos negocios, Departamento de Innovación Grupo Purdy
	Valorización de residuos	Federico Rodríguez Quesada	Dueño y fundador del Taller de Vehículos Eléctricos ECAC Trónica y el Instituto Técnico Automotriz ECAC
		Guillermo Pereira Ruiz	Ingeniero Industrial, fundador y dueño de FORTECH, experiencia en recuperación y valorización de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)
	GOBIERNO	Francisco Amen Funk	Ingeniero en la Unidad de Salud Ambiental, Dirección de Protección Radiológica y Salud Ambiental, Ministerio de Salud
Carolina Flores Valle		Administradora de Proyectos de electromovilidad de la Dirección de Energía del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)	
Alan Blanco Coto		Comisionado de movilidad eléctrica 2018-2022	
Eugenio Androvetto Villalobos		Director, Dirección de Protección Radiológica y Salud Ambiental	
José Antonio Quirós		Ingeniero de la Unidad Ejecutora del Tren Eléctrico	

Sector	Nombre	Perfil
ONG	Luis Roberto Chacón	Coordinador Nacional Costa Rica Proyecto de Residuos Electrónicos en América Latina – PREAL, asesor consultor del Ministerio de Salud

Apéndice 2. Guía para entrevistas

Guía para entrevista a experto ambiental

1. ¿Cuál es el impacto ambiental del incremento de los VE en el país?
2. ¿Cuál es la capacidad actual de Costa Rica para gestionar los residuos generados por la matriz de transporte eléctrico?
3. ¿Conoce el marco legal vigente en el país competente al manejo de los residuos de las baterías? ¿Cómo lo considera para el manejo de las baterías de ion-litio agotadas provenientes del cambio en la matriz vehicular costarricense?
4. ¿Considera que en el país puede existir o existe el mercado para reuso de estas baterías? Mencione en qué áreas o actividades.
5. ¿Qué consideraciones se deben tomar antes de destinar las baterías a reuso?
6. De acuerdo con el crecimiento de la flota costarricense de vehículos eléctricos ¿Considera como una posibilidad el desarrollo de un mercado de reciclaje de las LIBs agotadas?
7. Tomando en cuenta aspectos sociales, económicos, legales y ambientales ¿Es posible realizar el proceso de reciclaje de las baterías de ion-litio en el país?
8. ¿Cuáles podrían ser los riesgos sociales, económicos y ambientales asociados al reciclaje de las baterías?
9. ¿Cuáles son los mayores retos en el tema del manejo de las baterías de ion-litio de vehículos eléctricos agotadas?
10. ¿Cuáles acciones considera que se deberían tomar respecto a este tema desde el sector público? ¿Qué áreas están pendientes de trabajar respecto al tema?

Guía para entrevista a experto en baterías

1. ¿Cuáles son las diferencias entre las baterías de los vehículos eléctricos de gran tamaño (automóviles, buses, montacargas) y las de los pequeños (bicicletas, motocicletas)?
2. ¿Cuál es el proceso que sigue una batería de litio de un VE una vez agotada?
3. ¿Las baterías de los vehículos poseen identificadores (código o número de serie)?
4. ¿En Costa Rica existen importadores directos de baterías de ion-litio para VE?
5. ¿Cuál es la vida útil de las baterías de ion-litio para un vehículo eléctrico en Costa Rica, se cumple el criterio del 80% de la capacidad de carga que se expone en la literatura?
6. ¿Cómo puede afectar a un vehículo el utilizar una batería que no cumple ya con el criterio del 80% de la capacidad de carga?
7. ¿Es viable la restauración de la batería o sus módulos mediante la sustitución de las celdas dañadas?
8. ¿Considera que en el país puede existir o existe el mercado para reuso de estas baterías? Mencione en qué áreas o actividades.
9. De acuerdo con el crecimiento de la flota costarricense de vehículos eléctricos ¿Considera como una posibilidad el desarrollo de un mercado de reciclaje de las LIBs agotadas?
10. ¿Cuáles acciones considera que se deberían tomar respecto a este tema desde el sector público? ¿Qué áreas están pendientes de trabajar respecto al tema?

Guía para entrevista al sector no gubernamental

1. ¿Cuál es la capacidad actual de Costa Rica para gestionar los residuos generados por la matriz de transporte eléctrico?
2. ¿Conoce el marco legal vigente en el país competente al manejo de los residuos de las baterías? ¿Cómo lo considera para el manejo de las baterías de ion-litio agotadas provenientes del cambio en la matriz vehicular costarricense?
3. ¿De qué manera se está abordando la transformación de la matriz vehicular del país en temas de ambiente?
4. ¿Considera que en el país puede existir o existe el mercado para reuso de estas baterías? Mencione en qué áreas o actividades.
5. ¿Qué consideraciones se deben tomar para antes de destinar las baterías a reuso?
6. De acuerdo con el crecimiento de la flota costarricense de vehículos eléctricos ¿Considera como una posibilidad el desarrollo de un mercado de reciclaje de las LIBs agotadas?
7. ¿Cuáles podrían ser los riesgos sociales, económicos y ambientales asociados al reciclaje de las baterías? ¿Cuáles podrían ser los riesgos sociales asociados al reciclaje de las baterías?
8. ¿Cuáles son los mayores retos en el tema del manejo de las baterías de ion-litio de vehículos eléctricos agotadas?
9. ¿Cuáles acciones considera que se deberían tomar respecto a este tema desde el sector público? ¿Qué áreas están pendientes de trabajar respecto al tema?

Guía para entrevista al sector de importadores de VE

1. ¿Conoce el marco legal vigente en el país competente al manejo de los residuos de las baterías? ¿Cómo lo considera para el manejo de las baterías de ion-litio agotadas provenientes del cambio en la matriz vehicular costarricense?
2. ¿Conoce el término “Responsabilidad extendida al productor”?
3. ¿Qué pasa respecto a la responsabilidad de la agencia sobre el vehículo cuándo el cliente compra el vehículo en la agencia y luego lo vende a otra persona?
4. ¿Es posible implementar un modelo de Leasing de las baterías?
5. ¿Importan las baterías por aparte de los vehículos o solo dentro de los vehículos?
6. ¿Reciben baterías solo de los autos que venden directamente o también de vehículos de segunda, es decir, no adquiridos directamente con ustedes?
7. ¿Considera que la problemática asociada a los residuos de los vehículos eléctricos colectivos e individuales es el mismo?
8. ¿Considera que en el país puede existir o existe el mercado para reuso de estas baterías? Mencione en qué áreas o actividades.
9. De acuerdo con el crecimiento de la flota costarricense de vehículos eléctricos ¿Considera como una posibilidad el desarrollo de un mercado de reciclaje de las LIBs agotadas?
10. ¿Cuáles acciones considera que se deberían tomar respecto a este tema desde el sector público? ¿Qué áreas están pendientes de trabajar respecto al tema?

Guía para entrevista al sector de valorización de residuos

1. ¿Cuál es la capacidad de Costa Rica para gestionar los residuos generados por la matriz de transporte eléctrico?
2. ¿Conoce el marco legal vigente en el país competente al manejo de los residuos de las baterías? ¿Cómo lo considera para el manejo de las baterías de ion-litio agotadas provenientes del cambio en la matriz vehicular costarricense?
3. ¿Cuál es el proceso que sigue una batería de litio de un VE una vez agotada cuando se destina a reciclaje?
4. ¿Cuáles son los puntos en los que se captan las baterías para que no sigan en la corriente de residuos?
5. ¿Considera que en el país puede existir o existe el mercado para reuso de estas baterías? Mencione en qué áreas o actividades.
6. ¿Qué consideraciones se deben tomar antes de destinar las baterías a reuso?
7. De acuerdo con el crecimiento de la flota costarricense de vehículos eléctricos ¿Considera como una posibilidad el desarrollo de un mercado de reciclaje de las LIBs agotadas?
8. ¿Cuáles podrían ser los riesgos sociales, económicos y ambientales asociados al reciclaje de las baterías?
9. ¿Cuáles son los mayores retos en el tema del manejo de las baterías de ion-litio de vehículos eléctricos agotadas?
10. ¿Cuáles acciones considera que se deberían tomar respecto a este tema desde el sector público? ¿Qué áreas están pendientes de trabajar respecto al tema?

Guía para entrevista al sector del gobierno

1. ¿Cuál es la capacidad actual de Costa Rica para gestionar los residuos generados por la matriz de transporte eléctrico?
2. ¿Conoce el marco legal vigente en el país competente al manejo de los residuos de las baterías? ¿Cómo lo considera para el manejo de las baterías de ion-litio agotadas provenientes del cambio en la matriz vehicular costarricense?
3. ¿Cuál es la responsabilidad actual de los importadores de vehículos eléctricos sobre el manejo de los residuos de estas unidades?
4. ¿El PNTE plantea como indicador de cumplimiento respecto a los residuos de baterías generados “Programas aprobados sobre manejo de residuos de baterías y otros repuestos utilizados en vehículos eléctricos?” ¿Actualmente existe algún programa en el país?
5. ¿Considera que en el país puede existir o existe el mercado para reuso de estas baterías? Mencione en qué áreas o actividades.
6. ¿Qué consideraciones se deben tomar para antes de destinar las baterías a reuso?
7. De acuerdo con el crecimiento de la flota costarricense de vehículos eléctricos ¿Considera como una posibilidad el desarrollo de un mercado de reciclaje de las LIBs agotadas?
8. ¿Cuáles podrían ser los riesgos sociales, económicos y ambientales asociados al reciclaje de las baterías?
9. ¿Qué medidas está tomando el gobierno para enfrentar el manejo de estos residuos?
10. ¿Cuáles acciones considera que se deberían tomar respecto a este tema desde el sector público? ¿Qué áreas están pendientes de trabajar respecto al tema?

Apéndice 3. Preguntas de la encuesta a usuarios

TABLA 16
Encuesta realizada a usuarios de VE en Costa Rica

Sección	Preguntas	Opciones de respuesta
DATOS GENERALES	1. Género	Mujer Hombre Prefiero no indicar
	2. Edad	Menor a 25 años Entre 25 y 30 años Entre 31 y 40 años Entre 41 y 50 años Mayor a 50 años
	3. Educación	Primaria completa Secundaria incompleta Secundaria completa Técnico-Diplomado Universitaria incompleta Universitaria completa Estudios de Postgrado incompletos Estudios de Postgrado completos

Sección	Preguntas	Opciones de respuesta
4. Ubicación		Gran Área Metropolitana-Cartago Gran Área Metropolitana-San José Gran Área Metropolitana-Alajuela Gran Área Metropolitana-Heredia Fuera de la Gran Área Metropolitana-Cartago Fuera de la Gran Área Metropolitana-San José Fuera de la Gran Área Metropolitana-Alajuela Fuera de la Gran Área Metropolitana-Heredia Fuera de la Gran Área Metropolitana-Guanacaste Fuera de la Gran Área Metropolitana-Puntarenas Fuera de la Gran Área Metropolitana-Limón
5. ¿Cuánto tiempo lleva utilizando vehículos eléctricos?		Menos de 2 años Entre 2 y 5 años Más de 5 años
6. El vehículo es:		Propio Del lugar de trabajo
7. ¿Qué tipo de vehículo eléctrico posee?		Automóvil eléctrico Motocicleta eléctrica Bicicleta eléctrica Vehículo de carga (ej. Montacargas eléctrico) Otro (especificar en la pregunta 8)

Sección	Preguntas	Opciones de respuesta
	8. ¿Cuál es el vehículo eléctrico?	---
	9. ¿Cuáles de los siguientes aspectos influyeron en su decisión de usar transporte eléctrico? Anote la importancia.	Crisis climática Matriz energética del país Políticas del lugar de trabajo Inestabilidad en el precio de los combustibles Reducir la huella de carbono personal Políticas ambientales nacionales Uso de nuevas tecnologías
	10. ¿Qué tipo de batería utiliza su vehículo eléctrico? (Si la batería no es de litio pasar a la pregunta 12)	Plomo-Ácido Níquel-Cadmio Níquel-Hidruro metálico Ión Litio No conozco la composición
	11. ¿Qué tipo de batería de Ion-litio posee?	LiCoO ₂ (Óxido de cobalto de litio)-LCO LiFePO ₄ (Fosfato de hierro de litio)-LFP LiMn ₂ O ₄ (Óxido de manganeso de litio)-LMO Li(NiCoAl)O ₂ (Litio níquel cobalto óxido de aluminio)-NCA Sé que contiene litio, pero desconozco la composición Otra composición

BATERIAS

Sección	Preguntas	Opciones de respuesta
	12. ¿Cuál es el alcance de su batería con una sola de carga?	Menos de 100 km Entre 101km y 200km Entre 201km y 300km Entre 301km y 400km Más de 400km
	13. Vida útil estimada (o según el proveedor) al 100% de eficiencia	Menor a 2 años De 2 a 5 años De 5 a 8 años Superior a 8 años
	14. ¿Posterior a la compra de su vehículo que tipo de cambios a requerido realizar en la batería?	Cambio completo de la batería Cambio de algunas de las celdas por deterioro Otros cambios Ningún cambio
REÚSO, RECICLAJE Y DISPOSICIÓN FINAL	15. ¿Sabe que en Costa Rica existen gestores autorizados por el Ministerio de Salud para el manejo de las baterías de ion-litio?	Sí No
	16. ¿Cuáles opciones a considerado para el momento en que su batería se agote?	Almacenar en el hogar para necesidades futuras del vehículo Utilizar el potencial residual de la batería en otras actividades (reúso) Disposición final Venderla

Sección	Preguntas	Opciones de respuesta
		Entregar a la empresa representante del vehículo No he considerado ninguna opción Entregar a un gestor autorizado por el Ministerio de Salud
	17. ¿Cuáles de las siguientes posibilidades conoce usted para reúso de la batería?	Almacenamiento de energía solar Sistemas de bombeo de agua Sistemas de riego Sistemas de transporte con menor demanda energética Suministro de energía para equipo agrícola Suministro de energía para máquinas de limpieza Suministro de energía para equipo de construcción Sistemas de elevación Iluminación

Apéndice 4. Estimado de vida de la batería por distancia recorrida

TABLA 17

Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 100 km

Ciclos de carga	Autonomía (km)					
	100	200	300	400	500	600
1000	19,2	38,5	57,7	76,9	96,2	115,4
1500	28,8	57,7	86,5	115,4	144,2	173,1
2000	38,5	76,9	115,4	153,8	192,3	230,8
2500	48,1	96,2	144,2	192,3	240,4	288,5
3000	57,7	115,4	173,1	230,8	288,5	346,2
3500	67,3	134,6	201,9	269,2	336,5	403,8

TABLA 18

Periodo de vida en años estimado para un vehículo con recorrido semanal promedio de 400 km

Ciclos de carga	Autonomía (km)					
	100	200	300	400	500	600
1000	4,8	9,6	14,4	19,2	24,0	28,8
1500	7,2	14,4	21,6	28,8	36,1	43,3
2000	9,6	19,2	28,8	38,5	48,1	57,7
2500	12,0	24,0	36,1	48,1	60,1	72,1
3000	14,4	28,8	43,3	57,7	72,1	86,5
3500	16,8	33,7	50,5	67,3	84,1	101,0

ANEXOS

Anexo 1. Característica de los VE que circulan en el país

TABLA 19
Características de VE colectivos disponibles en Costa Rica

Marca	Modelo	Año	Capacidad (kWh)	Autonomía (km)		Potencia (kW)	Fabricante de las celdas
				WLPT*	NEDC**		
AION	S	2021	49,4	--	460	100	CATL
	V 70	2021	70	--	500	135	
	Y 70	---	64	--	500	135	
Audi	e-tron 50	2020	71	336	--	233	LG Chem Samsung SDI
	e-tron Sportback	2020	71	347	--	313	
	e-tron 55	---	95	440		304	
	e-tron S	---	95	368		375	
BMW	i3	2019	42,2	300	--	125	CATL
	i3s		42,2	280	--	135	
	iX M60	---	76,6	425	--	240	
BYD	e1	2020	32,2	--	300	45	BYD
	e2	2020	47,3	--	400	70	
		2020	35,2	--	300	70	
	e3	2021	35,5	--	300	70	
		2021	47,3	--	300	70	
	e5	2018	42,4	--	250	75	
	e6	2018	--	--	--	--	
	m3	2021	--	--	300	100	
	s2	2020	40,6	--	300	70	
	t3	2021	50,3	--	300	100	
	Tang EV	2020	82,8	--	500	180	
	D1	---	53,5	--	418	100	
	Han	---	76,9	--	550	160	
Yuan EV535 (S1 pro)	---	50,1	--	401	100		
Geely - Farizon	E200S	2022	54,72	--	260	90	Sunwoda
		2022	66,84	--	295	90	
	E5L	2022	41,86	--	280	60	

Marca	Modelo	Año	Capacidad (kWh)	Autonomía (km)		Potencia (kW)	Fabricante de las celdas
				WLPT*	NEDC**		
	E6	---	50,2		235	100	
Great Wall	R1	2020	33	--	351	35	CATL
	IQ	2020	45	--	401	120	
Hyundai	Ioniq Electric	2020	38,3	--	--	100	
	Kona Electric	2020	64	482	--	150	LG Chem
	Kona Prestige	2022	64	485	--	150	SK
	Kona Limited	2022	39,2	305	--	100	Innovation
Jaguar	i-Pace	2020	90	470	--	294	LG Chem
JMC	N801	2022	81,14	--	160	120	
	Vigus T500e	2022	60	--	--	120	CATL
Maxus	EV30	2020	35	--	230	71	CATL
MG	ZS	2020	44,5	263	--	110	CATL
Nissan	Leaf	2020	40	285	--	110	Envision
Renault	Kangoo	2019	33	--	270	44	Envision
	Twizy	2020	6,1	--	100	12,6	LG Chem
	Zoe	2019	41	300	--	80	
Tesla	S	2014	85	--	450	270	Panasonic
XPENG	G3	2019	47,1	--	351	145	CATL
		2020	66,5	--	520	145	
Yema	EC60	2019	59	--	470	80	--
	EC30	2019	48	--	350	80	
ZNA	RICH 6 PICK UP EV	2021	67,9	--	403	120	--
FAW	Besturn x40 EV460	--	52,5	--	350	140	CATL
JAC	e-S4	--	66	402	--	110	--
Joylong	A6EV	--	78	--	300	110	--
Lexus	UX 300e	--	54,3	300	--	150	CATL
Volvo	XC 40 P8	--	78	418	--	300	--

* De acuerdo con las pruebas del "Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure" (WLTP)

** De acuerdo con las pruebas del "New European Driving Cycle" (NEDC)

Nota: basado en datos de [10] [27]

Anexo 2. Características de algunos de los VE disponibles en Costa Rica

TABLA 20
Características de VE individuales (bicicletas y scooters) disponibles en Costa Rica

Marca	Voltaje (V)	Potencia (W)	Distribuidor
MTB Electro Asistida E-KALI	48	350	
Urbana Electro Asistida Uptown E-8X	36	350	Wild Bikes
Plegable Electro Asistida E-Flex	36	250	
CITY BIKE 11Z	36	350	
TRACK 01Z	48	500	Green Bike
TRACK 13Z	48	500	
KAL 500	48	500	Emotors
Astra	60	1000	
EVA -3	60	800	
PUMA	48	500	TailG
Modelo One	48	500	
TDR145Z	48	350	
Formula Bree	36	350	
Formula Cruzz	36	300	Repuestos Gigante
Formula LEO	36	300	
Formula X6	72	1500	
Stereo Hybrid 120 EXC	36	500	Xpits
Cross Hybrid 400	36	400	
Katana Easy- I	60	350	
Katana Easy- II	60	350	Katana
Katana Easy- III	48	500	
Turbo Vado SL 5.0	48	240	
Turbo Levo SL Comp	48	240	Bikestation
Turbo creo sl	48	320	
Turbo creo sl evo	48	320	
Outlaw 750w off-road electric bike	48	750	
Genesis r 400	36	400	Solaris Energía Renovable

Marca	Voltaje (V)	Potencia (W)	Distribuidor
Genesis trike	36	600	
Phantom XR 400	36	400	
Nano-c90 sport rambike	48	400	
Bor sport rambike	48	800	Importadora Monge
Bor sport con canasta rambike	48	800	
Nano-c90 sport rambike	48	400	
Rali city 26	36	250	EPA
Bicicleta cube acid 240 hybrid youth 2019	---	---	
Bicicleta cube acid 240 hybrid youth 2020	---	---	
Bicicleta cube acid hybrid one 500 2019	---	---	Ciclo Boutique
Bicicleta cube cross hybrid pro 400 2018	---	---	
Bicicleta cube access hybrid one 500 2019	---	---	

Nota: [28]

Anexo 3. Especificaciones de celdas de litio por geometría

TABLA 21
Especificaciones de algunas celdas prismáticas disponibles en el mercado

Fabricante	Tipo	Composición química	Peso (kg)	Dimensiones (mm)			Especificaciones eléctricas			
				Alto	Ancho	Espesor	Densidad energética (Wh/kg)	Capacidad nominal (Ah)	Voltaje nominal (V)	Potencia nominal (Wh)
CATL	---	NMC	0,99	148,0	98,0	27,0	186,9	50,0	3,7	185,0
	---		1,20	148,0	130,0	27,0	200,4	65,0	3,7	240,5
	---	LFP	2,80	180,0	180,0	50,0	137,1	120,0	3,2	384,0
	---		2,00	200,0	130,0	36,0	200,8	110,0	3,7	401,5
Panasonic	NCA463436A	NCA	0,01	34,3	35,5	4,6	201,8	0,7	3,6	2,5
	NCA623535		0,02	35,2	35,1	6,3	214,8	1,1	3,6	3,8
	NCA673440		0,02	33,8	40,4	6,8	216,4	1,2	3,6	4,4
	NCA593446		0,02	33,8	46,0	5,9	220,2	1,3	3,6	4,5
	NCA793540		0,02	35,1	40,5	8,0	220,8	1,5	3,6	5,5
	NCA103450		0,04	33,8	38,3	10,5	213,4	2,3	3,6	8,2
	UF553436G	---	0,02	33,9	35,6	5,5	189,7	0,8	3,7	3,0
	UF463450F		0,02	33,9	49,6	4,5	184,0	0,9	3,7	3,4
	UF553443ZU		0,02	33,8	42,8	5,6	197,9	1,0	3,7	3,7
	UF553450Z		0,02	33,9	49,8	5,6	190,8	1,2	3,7	4,3
	UF653450S		0,03	33,9	49,8	6,4	184,3	1,3	3,7	4,6
	UF103450P		0,04	33,8	48,8	10,5	180,7	1,9	3,7	7,0
Blade	LFP	3,92	905,0	118,0	13,5	164,9	202,0	3,2	646,4	
C15FHE	---	---	---	---	---	---	340,0	3,8	1292,0	

Fabricante	Tipo	Composición química	Peso (kg)	Dimensiones (mm)			Especificaciones eléctricas			
				Alto	Ancho	Espesor	Densidad energética (Wh/kg)	Capacidad nominal (Ah)	Voltaje nominal (V)	Potencia nominal (Wh)
BYD	C16FHA	---	---	---	---	---	---	220,0	3,8	836,0
	C17	---	---	---	---	---	---	80,0	3,8	304,0
	C20FP19119173	---	---	---	---	---	---	50,0	3,8	190,0
	C47FCCA	---	---	---	---	---	---	100,0	3,7	365,0
	CLP416068R	---	---	---	---	---	---	2,4	4,4	10,6
	CLP553850R	---	---	---	---	---	---	1,5	4,4	6,7
	CSL5049185D	---	---	---	---	---	---	8,0	4,6	36,8
Samsung	SDI94	NMC	2,10	173,0	125,0	45,0	164,7	94,0	3,7	345,9

Nota: basado en datos de: [43] [44] [45] [46]

TABLA 22
Especificaciones de algunas celdas cilíndricas disponibles en el mercado

Fabricante	Tipo	Composición química	Peso (kg)	Dimensiones (mm)		Especificaciones eléctricas			
				Diámetro	Altura	Densidad energética (Wh/kg)	Capacidad nominal (Ah)	Voltaje nominal (V)	Potencia nominal (Wh)
LG Chem	INR21700	NMC	0,07	21,1	70,2	257,1	4,8	3,7	17,5
				21,4	70,4	211,8	4,0	3,6	14,4
				21,4	70,8	266,9	5,0	3,6	18,2
	INR18650		0,05	18,4	65,2	208,0	2,6	3,6	9,4
				18,4	65,2	232,4	2,9	3,7	10,5
				18,5	65,3	240,0	3,0	3,6	10,8
				18,5	65,3	240,0	3,0	3,6	10,8
				18,4	65,2	270,2	3,4	3,6	12,2
				18,5	65,3	282,7	3,5	3,6	12,7
				18,2	65,1	220,0	2,9	3,7	10,7
Panasonic	UR18650ZTA	---	0,05	18,5	65,3	155,0	2,0	3,6	7,0
	UR18650RX	LMO		18,5	65,1	176,0	2,2	3,6	7,7
	UR18650A	---		18,2	65,1	207,0	2,8	3,6	9,9
	NCR18650PF	NCA		18,3	65,1	217,0	3,0	3,6	10,9
	NCR18650BD			18,2	65,1	248,0	3,3	3,6	11,7
	NCR18650BF			---	---	---	---	1,6	3,9
BYD	FC1450P	---	---	---	---	---	1,8	3,8	6,8
	FC1865	---	---	---	---	---	1,1	3,8	4,2
	FC1865P	---	---	---	---	---	1,1	3,9	4,3
	FC1865P-2	---	---	---	---	---	---	---	---

Fabricante	Tipo	Composición química	Peso (kg)	Dimensiones (mm)		Especificaciones eléctricas			
				Diámetro	Altura	Densidad energética (Wh/kg)	Capacidad nominal (Ah)	Voltaje nominal (V)	Potencia nominal (Wh)
	FC2665T	---	---	---	---	---	3,0	3,6	10,8
	LC0840	---	---	---	---	---	0,1	4,8	0,7
	LC0840H	---	---	---	---	---	0,2	4,6	0,7
	LC0865	---	---	---	---	---	0,3	4,8	1,2
	LC1044	---	---	---	---	---	0,4	4,6	1,7
	LC1051	---	---	---	---	---	0,4	4,6	1,7
Samsung	INR18650-25R	NCA	0,05	18,5	65,0	187,7	2,5	3,6	8,8
	ICR18650-26J	NMC		18,6	65,0	196,9	2,6	3,6	9,3
	INR18650-29E	NMC		18,6	60,0	221,3	2,9	3,7	10,4
	INR18650-30Q	NCA	18,6	65,0	226,0	3,0	3,6	10,6	
	INR18650-35E	NCA	18,6	65,2	256,6	3,4	3,6	12,1	
	INR21700-48X	NCA	0,07	21,3	70,8	261,6	4,8	3,6	17,5
	INR21700-50E	NMC	21,3	70,8	266,3	4,9	3,6	17,8	
	INR21700-50S	NCA	21,3	70,6	269,5	5,0	3,6	18,0	

Nota: basado en datos de: [44] [46] [47] [48]

TABLA 23
Especificaciones de algunas celdas tipo bolsa disponibles en el mercado

Fabricante	Composición química	Peso (kg)	Dimensiones (mm)			Especificaciones eléctricas			
			Largo	Ancho	Espesor	Densidad energética (Wh/kg)	Capacidad nominal (Ah)	Voltage nominal (V)	Potencia nominal (Wh)
LG Chem	NMC	0,82	330,00	100,00	16,50	268,18	60,00	3,66	219,91
	NMC	0,90	350,00	140,00	11,70	259,00	65,00	3,57	232,32
BYD	CSL2670A9	---	---	---	---	---	2,40	4,40	10,56
	CSL2680A7	---	---	---	---	---	2,74	4,40	12,04
	CSL2691C1	---	---	---	---	---	4,00	4,40	17,60
	CSL2693B2	---	---	---	---	---	4,05	4,40	17,82
	CSL26A5B8	---	---	---	---	---	4,00	4,40	17,60
	CSL2799B7	---	---	---	---	---	3,50	4,40	15,40
	CSL303770	---	---	---	---	---	1,20	4,40	5,28
	CSL315196	---	---	---	---	---	2,84	4,40	12,50
	CSL316974	---	---	---	---	---	2,70	4,45	12,02
	CSL3279B1	---	---	---	---	---	8,45	4,40	37,17
	CSL336472	---	---	---	---	---	2,58	4,40	11,35
	CSL3367E1	---	---	---	---	---	4,97	4,45	22,13
CSL3455G2	---	---	---	---	---	5,34	4,40	23,50	

Nota: basado en datos de: [44] [49] [50] [51]